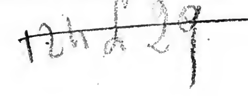



NAZIONALE
B. Prov.
XX
95
NAPOLI
BIBLIOTECA
VITT. EM. III




BIBLIOTECA PROVINCIALE
Armadio
Palchetto
Num.° d' ordine





ÉLÉMENTS

DE PHYSIQUE.

IMPRIMERIE DE E. DUVERGER, RUE DE VERNEUIL, N. 4

ÉLÉMENTS

DE PHYSIQUE

PAR C. C. PERSON,

Docteur en médecine, docteur ès-sciences, agrégé à l'Université pour les sciences physiques et mathématiques, agrégé à la Faculté de médecine de Paris pour la physique, membre des Académies de Rouen et de Nancy, professeur de physique de la ville et du collége royal de Rouen.

SECONDE PARTIE.



PARIS

GERMER BAILLIÈRE, LIBRAIRE-ÉDITEUR,
RUE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE, N. 13 *bis*.

LIBRAIRIE CLASSIQUE DE POILLEUX,
QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, N° 57.

Lyon, SAVY jeune, quai des Célestins 49.
Strasbourg, DERIVAUX ET LEVRAULT.
Londres, BAILLIÈRE, 219, Regent street.
Lyon, SAVY, Quai des Célestins, 49.

1837



TABLE MÉTHODIQUE

DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LA SECONDE PARTIE.

LIVRE SIXIÈME.

CHALEUR.

FIN DE LA TABLE MÉTHODIQUE.

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE.

LIVRE SIXIÈME.

CHALEUR.

CHAPITRE PREMIER.

TEMPÉRATURES.

§ Ier. *Mesure des températures.*

830. La *chaleur* consiste dans un mouvement vibratoire de la matière impondérable et des derniers atomes des corps. *La sensation de chaleur* n'est pas autre chose que la sensation qu'occasionne ce mouvement quand il a lieu dans nos organes. Mais on n'arrive à connaître ainsi la chaleur dans sa nature même qu'après une étude assez approfondie des phénomènes ; de sorte que nous nous contenterons d'abord d'une définitlon *empirique* qui la caractérisera, sans rien préjuger sur sa nature ; la *chaleur* sera pour nous la *cause* d'une sensation *sui generis* qui peut affecter presque tous nos organes, et qui se manifeste, par exemple, quand le soleil nous frappe ou quand nous approchons d'un foyer. Définition rationnelle de la chaleur. Définition empirique.

831. Il ne serait pas philosophique de recourir à une cause particulière pour expliquer le *froid;* la *privation de chaleur* suffit ; c'est l'opinion généralement admise, et cette opinion s'accorde avec tous les faits connus. Ce que c'est que le froid.

832. Nous étudierons d'abord les effets de la chaleur, puis nous examinerons la chaleur elle-même. Dans la pre- Ordre dans l'étude de la chaleur.

mière partie nous verrons les températures, les changements de volume et les changements d'état; dans la seconde nous nous occuperons de la mesure de la chaleur, de sa propagation et de sa nature.

Température.

833. La *température* est l'état d'un corps considéré comme chaud ou comme froid. On appelle corps chauds ceux qui donnent de la chaleur, corps froids ceux qui en enlèvent. Il faut observer que, d'après cette définition, les corps froids peuvent contenir de la chaleur; nous verrons même qu'aucun corps n'en est absolument privé.

Distinction entre la chaleur et la température.

834. De ce qu'un corps, à un instant donné, nous transmet plus de chaleur qu'un autre, nous n'avons pas le droit de conclure qu'il en contient davantage. Il ne faut donc pas confondre la chaleur avec la température; et pour citer un exemple qui mette cette distinction dans tout son jour, nous pouvons dire d'avance, qu'à poids égal, il y a plus de chaleur dans l'eau bouillante que dans le fer rouge, quoique évidemment la température de celui-ci soit plus élevée.

Les sens sont le premier moyen d'apprécier la température.

835. Lorsque nos sens sont dans l'état normal, il nous font reconnaître les *différences* de températnre avec assez d'exactitude : ainsi, on n'a pas besoin d'instrument pour savoir que l'hiver est plus froid que l'été, que l'eau, dans telle ou telle circonstance, s'échauffe ou se refroidit, etc.

Cas où ils sont en défaut.

Mais dans plusieurs cas les sens nous trompent, ou sont hors d'état de nous donner les indications dont nous avons besoin. Que l'une des mains soit chaude et l'autre froide, et qu'on les plonge dans l'eau à une température moyenne, le liquide paraîtra chaud pour l'une et froid pour l'autre, de sorte qu'il y aura contradiction. Les caves profondes ont, comme nous le verrons, constamment la même température; et cependant elles nous paraissent plus chaudes en hiver qu'en été. Comment constater avec les sens que tel jour, à telle heure, il faisait plus froid à Saint-Pétersbourg qu'à Paris? Ou que tel jour de cette année a été plus chaud que le pareil jour de l'année dernière?

Ce que c'est que le thermomètre en général.

836. Pour remédier à l'imperfection des sens on a recours à divers instruments, connus sous le nom de *thermo-*

mètres, nom peut-être impropre, parce qu'il fait croire que ces instruments mesurent la *chaleur*, tandis qu'ils ne font qu'*indiquer la température*, et ne sont en définitive que le sens de la chaleur perfectionné sous certains rapports.

837. Qu'on prenne un ballon à col long et étroit, qu'on le renverse dans un vase plein d'eau comme l'indique la figure, et qu'on l'échauffe légèrement, par exemple, en brûlant un peu de papier au-dessous : on fera sortir ainsi quelques bulles d'air; ensuite, par le refroidissement, l'eau montera à une certaine hauteur, par exemple en A. Maintenant avec cet appareil on pourra constater trois choses : — Thermomètre de Drebbel. Fig. 289.

1° Quand on échauffe l'air il se dilate; 2° quand on le refroidit, il diminue de volume ; 3° quand la température reste la même, le volume reste le même aussi. — Principes sur lesquels il est fondé.

Voilà donc un instrument qui pourra, plus exactement que nos sens, nous dire s'il fait plus chaud aujourd'hui qu'hier; plus froid dans un lieu que dans un autre. La température d'un appartement sera *définie* par la hauteur de l'eau, et toutes les fois que cette hauteur sera la même, il ne fera ni plus chaud ni plus froid, puisque la plus faible chaleur ou le plus léger refroidissement changent le volume de l'air, et par conséquent le niveau de l'eau. — Usages.

838. Telle était du moins l'idée qu'on se faisait d'abord de ce thermomètre imaginé vers 1600, par un physicien hollandais nommé Drebbel. Mais après l'invention du baromètre en 1643, on lui reconnut un défaut capital; c'est que la hauteur de l'eau peut changer, quoique la température reste la même. En effet, on sait par le baromètre que la pression de l'atmosphère est tantôt plus forte, tantôt plus faible; si elle augmente, elle fait évidemment monter l'eau sans qu'il y ait eu de refroidissement; donc les indications du thermomètre de Drebbel peuvent être fautives. On a d'après cela renoncé à cet instrument, mais les principes sur lesquels il est fondé servent encore de base à la construction des thermomètres plus parfaits qu'on possède aujourdhui; de sorte que les températures se trouvent toujours indiquées par les différents volumes que prend un certain corps. — Défaut principal.

Construction du thermomètre à mercure. Choix du tube.

839. Nous examinerons spécialement le *thermomètre à mercure*, qui est réellement le meilleur thermomètre; voyons d'abord comment on le construit.

Choix du tube.

1° On choisit un tube capillaire dont le diamètre intérieur soit partout le même. Pour s'en assurer on y fait entrer une petite colonne de mercure qu'on promène dans le tube; si elle a partout la même longueur, il est évident que le tube est bien calibré.

Formation du réservoir.

2° On souffle une boule à une extrémité. Pour cela on ramollit et on ferme à la lampe un des bouts du tube, après avoir attaché à l'autre une petite bouteille de caoutchouc. Quand le verre est ramolli, il suffit de presser la bouteille pour produire une boule. Si on soufflait avec la bouche on introduirait de la vapeur d'eau, dont il serait difficile de se débarrasser.

Introduction du mercure. Fig. 290.

3° L'étroitesse du tube ne permet pas d'y introduire directement le mercure, mais voici comment on s'y prend : Après avoir détaché la bouteille de caoutchouc, on chauffe sur des charbons la boule qu'on a soufflée; l'air dilaté par la chaleur sort en partie du tube dont on plonge alors tout à coup l'extrémité ouverte dans du mercure. Par le refroidissement, la force élastique de l'air restant diminue, et la pression de l'atmosphère fait monter une certaine quantité de mercure dans la boule. Pour la remplir entièrement, il faut maintenant faire bouillir le mercure qu'elle contient en l'exposant avec précaution sur des charbons. La vapeur mercurielle formée par l'ébullition chasse l'air; on plonge alors de nouveau l'extrémité ouverte dans du mercure; et comme la vapeur repasse bientôt à l'état liquide par le refroidissement, il se fait un vide où la pression atmosphérique fait monter le métal. Presque toujours cependant il reste une petite bulle d'air à l'entrée de la boule; on l'en chasse en faisant faire rapidement au thermomètre quelques tours dans lesquels le tube décrit la grande circonférence. Le mercure acquérant une force centrifuge plus grande que l'air, à cause de sa masse, s'éloigne du centre de rotation, et force par conséquent la bulle à s'en rapprocher (55).

On règle et on ferme.

4° Supposons l'appareil entièrement rempli; en chauf-

fant la boule, on chasse une portion du mercure telle que l'extrémité de la colonne reste dans le tube, à toutes les températures qu'on veut observer; c'est une affaire de tâtonnement. On ferme ensuite le tube sans y laisser d'air; pour cela on effile l'extrémité à la lampe, puis on chauffe la boule de manière à faire venir le mercure tout près de cette extrémité qu'on ferme alors au chalumeau. Quand le mercure se contracte par le refroidissement, il laisse le tube vide, ou du moins ne contenant qu'une très petite quantité d'air, ce qui n'a pas d'inconvénient. Si on laissait la totalité de l'air, le mercure en se dilatant ferait casser l'instrument. On pourrait à la rigueur ne pas fermer; mais il entrerait alors de la poussière dans le tube, et si dans quelque mouvement, une portion du mercure venait à sortir, la graduation, faite comme nous le dirons tout à l'heure, deviendrait fautive.

840. On sent l'utilité du réservoir que forme la boule; si on avait un simple tube fermé par un bout et de même longueur que celui du thermomètre, une très forte chaleur allongerait la colonne seulement de quelques millimètres; tandis qu'ici la boule, ayant une capacité à peu près invariable, la dilatation du mercure qu'elle contient se loge dans le tube et augmente considérablement la longueur de la colonne. On se sert même de tubes aplatis, afin que cette dilatation occupe une plus grande longueur. **Utilité du réservoir.**

841. Les changements dans la pression de l'air sont ici sans influence, puisque l'instrument est fermé. D'ailleurs fût-il ouvert, il en serait encore de même, parce que les liquides, et surtout le mercure, sont à peu près incompressibles (374). Ainsi, tous les changements qu'on reconnaît, indiquent des changements de température; de sorte qu'on a déjà tous les avantages du thermomètre de Drebbel, sans en avoir les inconvénients. **La pression de l'air est sans influence.**

842. Le principal avantage qu'on attende d'un thermomètre est la comparaison des températures. Il faut donc adopter une graduation telle, que deux thermomètres donnent exactement la même indication quand on les place dans les mêmes circonstances. On a d'abord employé pour **Recherche d'un thermomètre comparable.**

cela des moyens assez pénibles; mais enfin, deux physiciens, Christin, à Lyon, et Celsius, à Upsal, ont presque simultanément trouvé en 1741 un mode de graduation très simple, qui donne des thermomètres parfaitement comparables, quelles que soient les dimensions, et sans qu'on ait besoin de connaître le rapport entre les divisions du tube et la capacité de la boule. Ce procédé est fondé sur deux faits qu'on peut aisément constater avec l'instrument sans graduation; c'est 1° que la glace se fond toujours à la même température; 2° que la vapeur de l'eau bouillante a toujours la même température sous la même pression.

Températures fixes qui servent à sa construction.

Procédé pour marquer les points fixes.

843. Voici maintenant comment on s'y prend pour marquer les deux températures fixes sur le tube : On met dans une chambre, où il ne gèle pas, un vase contenant de la glace pilée, ou de la neige qui bientôt commence à fondre; on y plonge le thermomètre et on voit le mercure descendre, puis s'arrêter à une hauteur invariable; de sorte qu'il est facile de marquer exactement cette hauteur. Il est bon que le vase soit percé de trous, afin que l'eau puisse s'écouler, et que le thermomètre soit toujours en contact avec la glace fondante. Pour avoir ensuite la hauteur correspondante à l'eau bouillante, on se sert d'un vase en fer-blanc, dont le couvercle est surmonté d'un tuyau en plusieurs pièces pour qu'on puisse lui donner la longueur convenable. La pièce supérieure est fermée par un bouchon B dans lequel passe à frottement le tube du thermomètre. Le vase contient un peu d'eau qu'on fait bouillir; il vaut mieux que le thermomètre ne plonge pas, parce que la vapeur a une température plus invariable encore que celle du liquide; cette vapeur sort par une ouverture latérale après avoir échauffé toute la colonne de mercure. On élève le tube du thermomètre à travers le bouchon, seulement jusqu'à ce que l'on voie le sommet de la colonne qu'on marque lorsqu'il est stationnaire.

Fig. 291.

Remarque sur le point fixe supérieur.

844. Nous avons dit que la vapeur sortant de l'eau bouillante avait toujours la même température, pourvu que la pression fût la même. Il faut donc que ce soit sous une *même* pression qu'on marque le second point fixe de tous

les thermomètres. Les physiciens sont convenus de prendre cette pression de 0m,76. Mais il n'est pas nécessaire d'attendre que le thermomètre soit précisément à cette hauteur. Nous verrons (1037) qu'on peut à l'aide d'un petit calcul se dispenser d'attendre ainsi.

845. L'intervalle compris entre les deux points fixes se divise en 100 parties égales qu'on appelle degrés. On marque 0 au point correspondant à la glace fondante et 100° au point qui répond à l'eau bouillante. Au-dessus et au-dessous de cet intervalle, on porte autant de degrés que la longueur du tube peut en contenir; mais il est inutile d'en porter plus de 40 au-dessous de zéro, parce que à cette température le mercure est gelé; et d'aller au-delà de 360, parce que le métal commence alors à bouillir. Graduation du thermomètre.

846. Les degrés s'indiquent en écrivant un petit zéro au au-dessus et à droite du nombre, ainsi 25° signifie 25 degrés. Pour distinguer les degrés au-dessous de zéro, on le fait précéder du signe—;de sorte que—10° signifie 10° au-dessous de zéro. Manière d'écrire les températures.

847. On a reconnu dernièrement que les points fixes s'élevaient peu à peu dans les thermomètres nouvellement construits; de sorte que, par exemple, le point de la glace fondante, déterminé par une expérience nouvelle, pouvait se trouver d'un ou même de deux degrés au-dessus de zéro marqué sur l'instrument. Il est certain que cette élévation est due en partie à une diminution du réservoir par la pression de l'air; mais, comme on l'observe encore dans les thermomètres qui sont restés ouverts, on l'attribue à la lenteur que met le verre à reprendre son état primitif après qu'on l'a chauffé, soit pour souffler la boule, soit pour faire bouillir le mercure. Il paraît que l'élévation du zéro s'arrête au bout d'un an ou deux, de sorte qu'il serait bon de ne marquer les points fixes qu'au bout de ce temps. On voit de plus qu'on court risque d'altérer la graduation de son thermomètre si on le soumet à une température très élevée. Élévation du zéro.

848. Le thermomètre à alcool se construit exactement comme le thermomètre à mercure. Ordinairement on co- Thermomètre à alcool.

lore l'alcool en rouge par de l'*orseille*, matière préparée avec certains lichens.

Comparaison des deux thermomètres.

849. Les thermomètres à alcool et à mercure ne sont rigoureusement d'accord que pour les points fixes 0° et 100°. Dans l'intervalle, le thermomètre à alcool est toujours en arrière, c'est-à-dire qu'il désigne la même température par des nombres plus petits; par exemple, il marque 10° quand l'autre en marque 12,5; il s'arrête à 50° quand l'autre va jusqu'à 62°,5, de sorte que la différence peut être de plus de 12°.

Avantages du thermomètre à alcool.

850. Les avantages du thermomètre à alcool sont 1° de pouvoir indiquer des températures très basses, l'alcool pur ne gelant jamais; 2° de donner, toutes choses égales, des degrés plus longs, parce que l'alcool se dilate beaucoup plus que le mercure.

Ses inconvénients.

851. Par compensation ce thermomètre ne peut indiquer les températures élevées; car au-delà de 100° la vapeur alcoolique a assez de force pour briser l'instrument. De plus, il est très lent à prendre la température, ce qui induit souvent en erreur; on le croit stationnaire, quand il ne l'est pas encore. Un inconvénient capital, c'est que l'alcool qu'on met dans les différents thermomètres est loin d'être identique; aussi deux instruments de ce genre sont rarement d'accord. Le capitaine Parry, qui dans ses voyages vers le pôle avait emporté dix thermomètres à alcool, construits par les meilleurs artistes, a vu quelquefois entre eux des différences de 17° de la division anglaise (854).

Avantages du thermomètre à mercure.

852. Le mercure au contraire a l'avantage bien précieux de pouvoir être obtenu facilement d'une pureté parfaite, ce qui permet de construire des thermomètres parfaitement comparables. Comme il ne bout qu'à 350° à l'air libre, il peut aller jusqu'à 360° dans le thermomètre, la pression due à la colonne de mercure retardant l'ébullition. Ses indications sont bien plus rapides que celles du thermomètre à alcool. Enfin entre zéro et 100° les variations sont proportionnelles à la chaleur qu'il absorbe, c'est-à-dire que pour le faire varier de 10, 20, 30° dans une partie quel-

conque de cet intervalle il faut lui donner précisément 10, 20, 30 fois autant de chaleur que pour le faire monter de 0° à 1°. Nous verrons plus loin comment on constate cette propriété importante qui n'appartient pas au thermomètre à alcool.

853. Quand l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante est divisé en 100° le thermomètre s'appelle *centigrade;* dans le thermomètre de *Réaumur* cet intervalle est divisé en 80 parties; de là il suit que chaque degré de Réaumur vaut un degré centigrade plus un quart. Si donc on demande ce que valent 16° de Réaumur, on répondra qu'ils valent 16° centigr. + 16 quarts, en tout 20° centigr. Il est facile de généraliser.

Échelle de Réaumur.

Conversion des degrés de Réaumur en degrés centigrades.

854. Le thermomètre de Fahrenheit, qui est adopté en Angleterre, n'a pas la glace fondante pour point fixe inférieur; son zéro est donné par un certain mélange de neige et de sel, et le point de l'eau bouillante est marqué 212. Son 32° degré répond à notre 0; d'où il suit que l'intervalle que nous divisons en 100 parties est dans ce thermomètre divisé en 180, et que par conséquent 9° F valent 5° C. Maintenant si je veux convertir 86° F par exemple en degrés centigr., j'observe qu'entre 32° et 86° il y a 54°; or évidemment autant de fois j'aurai 9 dans ce nombre autant de fois j'aurai 5° C; c'est par conséquent 30° C. On peut de cet exemple particulier tirer cette règle générale : Du nombre donné retranchez 32, multipliez le reste par 5 et divisez par 9; le quotient est le nombre cherché. Si le nombre donné était plus petit que 32, on tomberait sur un résultat négatif en appliquant la règle, et en effet on doit dans ce cas trouver des degrés au-dessous de zéro.

Échelle de Fahrenheit.

Conversion des degrés de Fahrenheit en degrés centigrades.

Fig. 292.

855. Il y a des thermomètres qui, sans qu'on ait besoin de les observer continuellement, donnent la plus haute et la plus basse température qui aient eu lieu dans un certain intervalle de temps; le meilleur instrument de ce genre est le thermomètre de *Six* modifié par *Bellani*. Le réservoir R contient de l'alcool qui s'étend jusqu'en M; de M en M' il y a du mercure. Quand l'alcool R et le mercure M M' se dilatent, l'extrémité M' de la colonne pousse une petite boule d'émail B terminée par une petite queue recourbée

Thermomètre à maxima et à minima.

Fig. 293.

Fig. 294. qui la tient à frottement dans le tube, de sorte qu'elle reste à l'endroit où le mercure l'a fait monter, indiquant ainsi la plus haute température qui ait eu lieu. Dès qu'il y a refroidissement, l'alcool R se contracte, le mercure M qui le suit pousse à son tour une petite boule d'émail qui marque les minima de température. Pour faire l'observation de la journée, on met le matin les deux petites boules en contact avec le mercure; cela se fait avec un aimant qui les attire où l'on veut à cause d'un petit morceau de fil de fer qui est contenu dans leur queue. L'instrument se compose comme on voit de deux thermomètres qui doivent toujours être d'accord. On détermine leurs points zéro avec de la glace; le reste de la gradation se fait par des comparaisons de 10 en 10° avec un bon thermomètre étalon, vu que le tube qui est un peu gros n'est jamais bien cylindrique et que d'ailleurs ces thermomètres ne vont pas jusqu'à 100°. Les degrés de celui qui donne les maxima sont un peu plus grands, puisqu'ils sont dus à la dilatation réunie de l'alcool et du mercure. L'appareil doit être suspendu verticalement pour éviter le mélange des liquides. La colonne qui est au-dessus de M′ a pour usage de forcer le mercure à suivre toujours l'alcool quand il remonte vers le réservoir en se contractant.

Mesure des hautes températures.

Pyromètre de Wedgewood.

Fig. 295.

856. Les instruments qui servent à mesurer les hautes températures portent le nom de *pyromètres*. Le plus connu est le pyromètre de *Wedgewood*; il est fondé sur le *retrait* de l'argile, c'est-à-dire sur la propriété qu'a cette substance de diminuer de volume à mesure que la température s'élève, et de conserver cette diminution après le refroidissement. On fabrique dans un même moule de petits cylindres d'argile, et, pour apprécier facilement leurs changements de volume, on a deux règles de cuivre soudées sur une plaque de même métal, et formant un angle entre elles. Le cylindre présenté à l'ouverture de l'angle pénètre d'abord jusqu'à un certain point marqué O. Quand ensuite il a été soumis, par exemple, à la température où le cuivre commence à se fondre, il peut s'enfoncer davantage, et le point où il s'arrête est marqué 27° sur l'instrument. On dit d'a-

près cela que le cuivre fond au 27° degré du pyromètre de Wedgewood. Le premier instrument de ce genre a été gradué arbitrairement; les autres ont été faits d'après cet étalon. Cependant leurs indications ne sont pas exactement comparables, parce que l'argile n'est pas identique dans les différents lieux et que son retrait dépend non-seulement de la température, mais aussi du temps pendant lequel agit la chaleur.

Ses défauts.

857. Après avoir examiné les instruments propres à mesurer les températures, voyons maintenant comment on s'en sert. Prendre la température d'un corps avec un thermomètre, c'est amener l'instrument à avoir la même température que le corps que l'on considère. Soit, par exemple, une masse d'eau chaude dont on veut prendre la température; on y plonge le thermomètre; la chaleur fait monter le mercure qui s'arrête bientôt à une certaine hauteur. L'eau continue sans doute à donner de la chaleur à l'instrument, mais celui-ci en rend autant qu'il en reçoit puisqu'il reste stationnaire. D'après cela, le thermomètre considéré comme donnant de la chaleur est dans le même état que l'eau qui le touche, c'est-à-dire qu'il est à la même température. On a donc la température de l'eau en lisant l'indication thermométrique.

Ce que c'est que prendre la température.

858. On doit s'assujettir à certaines précautions pour faire une observation thermométrique bien exacte. Observons d'abord qu'en général le thermomètre altère la température qu'il s'agit deprendre. Ici, par exemple, la chaleur reçue par l'instrument a diminué d'autant celle de l'eau. On peut négliger cette erreur quand la masse d'eau est assez considérable par rapport au thermomètre, et en général toutes les fois que la chaleur absorbée par l'instrument ne change pas sensiblement la température du corps que l'on considère.

Précautions pour prendre la température.

1° Il faut que la chaleur absorbée par le thermomètre n'altère pas sensiblement la température à mesurer.

859. Il est évident que, pour prendre exactement la température d'un corps, le thermomètre doit être de toute part en contact avec lui. S'il s'agit, par exemple, d'une barre de fer, il ne suffira pas de la toucher avec l'instrument; il faudra y creuser une cavité dans laquelle on mettra du mer-

2° L'instrument doit être en contact de toutes parts avec le corps dont on veut prendre la température.

cure pour y placer ensuite un petit thermomètre. A la rigueur, on doit plonger le tube lui-même jusqu'au point où le mercure peut monter ; autrement les observations ne seraient pas comparables, puisque la quantité de mercure qui reste dans la boule étant variable, on soumettrait à l'action de la chaleur dans les différents cas des quantités de mercure différentes qui pourraient présenter la même dilatation sans avoir la même température. Dans l'usage ordinaire, on omet souvent cette précaution, et l'erreur est en effet négligeable, quand le tube est très fin par rapport au réservoir, ou quand la différence de température n'est pas grande ; mais dans les observations rigoureuses il faut y avoir égard (937 4°).

3o Il faut que le thermomètre soit stationnaire. 860. Un point capital, c'est d'être bien assuré que le thermomètre est stationnaire quand on lit son indication ; les gros thermomètres, surtout ceux à esprit-de-vin, sont très longs à prendre la température.

Remarque. 861. A la rigueur, l'instrument ne donne que la température du point où il est placé. Si le corps que l'on considère a une certaine étendue, il faut répéter l'opération pour les divers points ; mais, dans les cas ordinaires, et surtout par les liquides et les gaz on peut admettre que l'indication est vraie pour une distance assez grande.

Température de l'air. 862. Il y a ensuite des précautions particulières pour prendre la température des différents corps. Pour avoir celle de l'air, par exemple, il ne faut pas tenir le thermomètre à la main, ni le poser sur des corps qui pourraient lui transmettre une chaleur étrangère ; on doit le suspendre librement et le plus loin possible des murailles. Il est évident que le thermomètre doit être à l'ombre puisque ce n'est pas l'effet des rayons solaires qu'on veut observer. Ce sera donc au nord du bâtiment qu'il faudra l'établir. On fixe même quelquefois deux larges disques de bois l'un au-dessus l'autre au-dessous du thermomètre, pour le préserver du rayonnement des objets circonvoisins et avoir plus exactement la température de la couche d'air où il est placé.

Température de l'eau à la surface. 863. Si on veut prendre la température de l'eau d'un lac, d'une rivière à la surface, il suffira de plonger un

thermomètre dans un seau plein de cette eau ; car l'expérience prouve que la température d'une masse un peu considérable varie très lentement, en sorte qu'on a tout le temps de faire l'observation.

864. Pour prendre la température à une profondeur de 100, de 200^m, on enveloppe la boule du thermomètre d'une couche de cire d'un pouce ou deux d'épaisseur. Dans cet état, il faut quelquefois plus d'une heure pour que l'instrument prenne la température du lieu où il est placé; mais aussi quand il l'a prise, il la conserve très longtemps. Si donc après avoir lesté le thermomètre, on le descend à la profondeur voulue, et qu'après l'y avoir laissé quelques heures on le retire, il donnera exactement la température de la couche où il était plongé. A une profondeur déterminée.

§ II. *Températures remarquables.*

865. On prend ordinairement la température de l'homme en plaçant un thermomètre dans la bouche; et on trouve généralement 37° centigrades. Les différences de nourriture, de saison, de climat produisent seulement des variations de quelques dixièmes de degré. Quant à la température des parties superficielles, elle est moins élevée et de plus très variable. Des expériences récentes de M. Becquerel et Breschet ont montré qu'à égale profondeur, le tissu cellulaire était un peu moins chaud que le tissu musculaire. Pendant l'état fébrile, ils ont trouvé dans les muscles une élévation de plus de 3°. Température de l'homme.

866. La température des animaux est constante pour chaque espèce. Chez les oiseaux elle va jusqu'à 42°; celle des mammifères est à peu près celle de l'homme. Tous les autres animaux ont une température à peine supérieure à celle du milieu qu'ils habitent. Il en est de même des végétaux; quelques-uns seulement, les *arums*, par exemple, présentent une élévation remarquable de température dans les fleurs, au moment de la fécondation. Température des animaux. Température des végétaux.

867. La température du sol est extrêmement variable, suivant les heures de la journée, suivant la nature du terrain, Température de la terre à la surface.

son exposition, les mouvements de l'air, etc. Un fait bien remarquable, c'est que quand il n'y a pas de vent la température du sol est souvent très différente de celle de l'air; dans la journée, le sol est plus chaud que l'air; c'est le contraire pendant la nuit. Ainsi, pendant la nuit, le docteur *Wells* a vu des thermomètres placés sur l'herbe marquer quelquefois 7 à 8° de moins qu'à un ou 2 mètres de hauteur. Il y a aussi, quand l'air est calme, des différences très grandes entre des corps très voisins, surtout si le ciel est serein.

Température à différentes profondeurs.

868. On prend la température de la terre à différentes profondeurs avec des thermomètres qui restent enterrés mais dont les tiges sont assez longues pour qu'on puisse lire les indications. On a soin de tenir compte de l'inégalité des températures de la tige et du réservoir (937). Les thermomètres plus superficiels donnent les renseignements nécessaires pour faire cette correction sur les thermomètres plus profonds. Il résulte des expériences faites ainsi par *M. Quetelet* à Bruxelles, qu'à une profondeur d'un mètre, la

Limite des variations diurnes.

température reste la même le jour et la nuit; qu'à 8^m, la différence entre l'été et l'hiver va tout au plus à 1°,5. Cela montre avec quelle lenteur la chaleur pénètre; aussi, à cette

Limite des variations annuelles.

profondeur de 8^m, le maximum de température n'a lieu que vers le milieu de décembre. M. Poisson avait trouvé précédemment le même résultat d'après les observations faites à Paris.

Première couche de température invariable.

869. Dans nos climats, la différence des saisons devient insensible à une profondeur de 24^m. A Paris, dans les caves de l'Observatoire qui ont 28^m, la température reste constamment à 11°. Dans les régions équinoxiales, d'après les observations de *M. Boussingault*, il suffit d'enfoncer le thermomètre à un pied en terre, dans un lieu qui ne reçoive pas de soleil, pour qu'il marque le même degré à un ou deux dixièmes près pendant tout le cours de l'année.

Chaleur intérieure du globe.

870. A mesure qu'on descend au-dessous de la première couche de température invariable, on trouve que la chaleur augmente. Ce fait a été constaté dans un grand nombre de mines, tant en Europe qu'en Amérique; et il a été

surtout mis hors de doute par un mode d'observation dû à M. Arago. Un *puits artésien* est, comme on sait, un trou vertical ayant ordinairement plusieurs centaines de pieds de profondeur, et par lequel l'eau d'une nappe souterraine s'échappe à la surface du sol. Cette eau qui se renouvelle sans cesse doit bientôt arriver avec la température de la couche d'où elle provient; or, l'expérience prouve que cette température est en général d'autant plus élevée que le puits est plus profond. On a trouvé, terme moyen, 1° d'élévation pour une profondeur de 30m; à Paris, c'est 38m. Il y a, suivant les localités, des variations très fortes. Eau des puits forés.

871. Il est assez vraisemblable d'après cela que les sources thermales doivent leur température aux couches profondes qu'elles traversent. Les expériences proposées par M. Arago sur les eaux d'Aix résoudront peut-être un jour la question. Il paraît qu'en Europe, la source thermale la plus chaude est celle de *Chaudes-Aigues*, en Auvergne; l'eau cependant est loin de bouillir, car elle marque seulement 80°. M. Boussingault en 1823 a trouvé 96°,6 à la source de las Trincheras (Venezuela). Cette source ne paraît avoir aucune connexion avec un volcan. Les sources qui ont quelque communications avec des volcans en activité peuvent fournir de l'eau tout-à-fait bouillante, comme on le voit pour les *Geysers* en Islande. Les volcans eux-mêmes ont été considérés comme des preuves de la chaleur centrale de la terre, mais on les regarde maintenant plutôt comme le résultat de quelque action chimique purement locale. Sources thermales.

872. Suivant M. de Humboldt, la température de la mer ne dépasse nulle part 30°. Péron assure cependant avoir trouvé 31° près de l'équateur. Cette température maximum offre une très grande importance, ainsi que l'observe M. Arago, en ce qu'elle caractérise l'état actuel du globe, sous le rapport de la chaleur. Prise avec les précautions convenables et loin des continents, elle pourra décider par la suite si la terre s'échauffe et se refroidit. Température des mers.

La température de la mer décroît très lentement à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur; c'est seulement vers le

50ᵉ degré que l'eau gèle quelquefois le long des côtes ; il faut arriver au 70ᵉ degré pour trouver des glaces flottantes; c'est vers le 80ᵉ qu'on rencontre les glaces fixes. Les mers intérieures, à cause de leur plus petite masse, gèlent plus facilement, mais aussi s'échauffent plus pendant l'été, à latitude égale. Comme la température des mers varie moins suivant la saison que celle de l'air ou du sol, on conçoit que sur les côtes les hivers soient moins rigoureux, et les étés moins chauds que dans l'intérieur des terres ; les vents de mer égalisent la température ; cela explique comment on peut cultiver l'olivier sur les côtes de Bretagne.

Entre les tropiques et dans les zones tempérées, la mer est plus chaude à la surface que vers le fond ; c'est le contraire vers le pôle à partir du 70ᵉ parallèle. A de moyennes latitudes, une profondeur de 100 brasses donne un refroidissement de 7 à 8°. Près de l'équateur, Péron a trouvé 8°,5 à 390ᵐ, et 7 à 700ᵐ, la surface étant à 31°. A 20° de latitude ; le capitaine Sabine a trouvé encore 7°,5 à plus de 2000ᵐ de profondeur, tandis qu'à la surface il y avait 28°.

Température des lacs.

873. Les lacs alimentés par les fontes de neige, comme ceux de la Suisse, ont vers leur fond une température qui diffère peu de 4° ; nous verrons à quoi tient ce phénomène remarquable. Dans les masses d'eau tranquille, le refroidissement dû à la profondeur est beaucoup plus rapide que dans la mer ; dans le lac de Genève, par une température de 21°,2 à la surface on trouve déjà une différence de 15° à 30 brasses.

Température des rivières.

874. Pendant l'hiver les rivières sont généralement moins froides au fond qu'à la surface ; c'est le contraire pendant l'été. Mais la différence s'efface quand la profondeur n'est pas très grande et que le cours est rapide ; ainsi, pour le Rhin, sur un fond de 15 pieds de profondeur, la température pendant l'hiver a été trouvée la même qu'à la surface.

Froid des hautes régions.

875. On sait depuis bien longtemps qu'il fait plus froid dans les lieux élevés. Voici quelques observations qui mettent bien ce fait en évidence ; elles ont été faites simultanément à Genève, à Fribourg et à l'hospice du Mont-Saint-

Bernard ; les hauteurs sont comptées au-dessus du niveau de la mer :

Genève 407^m	Fribourg 635^m	Saint-Bernard 2491^m
30	27°,7	15°
20	18	7
10	8,2	—1
— 10	—11,3	—17

876. A cause du froid qui règne dans les hautes régions, on voit, même dans les pays les plus chauds, le sommet de certaines montagnes rester constamment couvert de neige; la chaleur de l'été suffit à peine pour fondre ce qui est tombé pendant l'hiver. Pour trouver le point où les neiges subsistent ainsi même au milieu de l'été, il faut en général s'élever d'autant plus au-dessus du niveau de la mer qu'on est plus près de l'équateur comme on le voit par ce tableau : Limite des neiges perpétuelles.

Zone torride	4,800^m.
Caucase	3,300
Pyrénées	2,700
Alpes	2,000
Norwége	1,060
Laponie	950

Plus au nord les neiges perpétuelles se trouvent au niveau même de la mer. La température moyenne (883) de la limite n'est pas toujours 0° comme on pourrait d'abord le croire, elle varie suivant la latitude. C'est 1°,5 vers l'équateur, —6° en Norwége, et —3° environ dans les zones tempérées.

877. Le décroissement de température, quand on s'élève dans l'atmosphère, peut être exactement mesuré dans les ascensions aérostatiques. M. Gay-Lussac, lors du voyage dont nous avons parlé (621), a pris 20 indications thermométriques à différentes hauteurs, d'où il est résulté que l'abaissement était d'environ 1° pour 170 mètres. Il est à re- Température à différentes hauteurs.

marquer que, dans les nuits calmes et sereines, la température de l'air, au lieu d'aller en diminuant à mesure qu'on s'éloigne du sol, présente au contraire une progression croissante, au moins jusqu'à une certaine hauteur. Ainsi, Pictet a vu qu'un thermomètre, élevé seulement de deux mètres et demi, marquait toute la nuit 2°,5 de moins qu'un instrument pareil suspendu à 17 mètres; le contraire avait lieu à midi. C'était deux heures environ après le lever du soleil et deux heures après son coucher que les deux instruments étaient d'accord.

Température des espaces planétaires.

878. D'après diverses considérations qui offraient assez de probabilité, Fourier avait assigné —60° pour la température qui règne au-delà de l'atmosphère; mais M. Poisson a été conduit à un résultat différent. Il pense que l'espace dans lequel se meut actuellement la terre est tout au plus à 13° au-dessous de zéro. Cette température, qui résulte du rayonnement des divers soleils dont l'univers se compose, doit d'ailleurs varier d'un point à l'autre; de sorte que notre système planétaire, qui selon toute apparence est emporté d'un mouvement général de translation, a pu ou pourra passer par des points d'une température différente.

Températures extrêmes sur le globe.

879. C'est dans l'intérieur de l'Afrique qu'on observe les plus fortes chaleurs. La température de l'air y dépasse quelquefois 40° à l'ombre. On a même vu le thermomètre à 53° pendant le *Sirocco;* mais on attribue cette température excessive à la présence d'une poussière sablonneuse dans l'air. Le capitaine Parry, en février 1819, a vu le thermomètre à 46° au-dessous de zéro, dans l'île Melville, dont la latitude est de 74°; le mercure y reste gelé cinq mois de l'année. Depuis, le capitaine Ross, dans son voyage aux régions polaires, a observé un abaissement de —56°.

Températures extrêmes à Paris.

880. A Paris, le plus grand froid a été de 23°, 5 (25 janvier 1795); la plus forte chaleur de 38°4 (8 juillet 1793); le thermomètre était cependant à l'ombre. Dans nos climats, c'est généralement vers le milieu de janvier et le milieu de juillet que s'observent les plus grands froids et les plus fortes chaleurs. La température la plus élevée de la journée a lieu vers deux heures de l'après-midi en été, et

vers trois heures en hiver; la plus basse s'observe un peu avant le lever du soleil.

881. Si dans une journée on observait, par exemple, tous les quarts d'heure le thermomètre qui donne la température de l'air (862), et si, après avoir additionné ces 96 observations, on prenait la 96e partie de la somme, on aurait la température *moyenne* de la journée. On trouve plus facilement cette température moyenne et avec beaucoup d'approximation (du moins dans les climats qui ne sont pas trop au nord), en prenant la demi-somme des températures extrêmes observées aux heures convenables, ou données par le thermomètre à maxima et à minima. On peut encore prendre pour température moyenne celle de huit heures et demie du matin; car l'expérience prouve qu'elle diffère très peu en général de la véritable moyenne. Température moyenne d'un jour.

882. En additionnant toutes les températures moyennes du mois et divisant par le nombre de jours, on a la température moyenne du mois, et enfin la température moyenne de l'année en divisant par 12 la somme des températures moyennes des mois. L'observation montre que la température moyenne de l'année diffère peu de celle des premiers jours d'avril ou d'octobre, ce qui fournit des procédés plus expéditifs pour sa détermination. Température d'un mois, d'une année.

883. On appelle température moyenne d'un lieu, ou température *climatérique*, la température moyenne de l'air résultant des observations de plusieurs années; il en faut généralement dix ou douze pour que les variations accidentelles se compensent. A Paris, d'après 29 années d'observations relevées par M. Bouvard, la température moyenne est de 10°,822. En général, c'est à peu près celle de la première couche de température invariable (869), ce qui donne encore un moyen très prompt de connaître la température moyenne d'un lieu où l'on ne peut séjourner. L'eau des puits d'une profondeur médiocre la donne aussi avec assez d'exactitude. Dans les tropiques, la couche de température invariable est si voisine du sol que l'observation est très facile. Un fait bien remarquable signalé par M. Poisson, c'est que la température moyenne du sol pendant l'année entière, Température moyenne d'un lieu.

diffère très peu de la moyenne prise dans l'air. Ce résultat est vrai dans la zone torride et dans les zones tempérées, mais non pas à ce qu'il paraît dans les climats froids; car M. Rudberg, à Stockholm, a trouvé la température moyenne du sol plus élevée que celle de l'air; la différence est d'un degré.

Lignes isothermes.

884. En marquant sur un globe terrestre tous les points dont la température moyenne est de 10°,8 comme à Paris, on trouve une ligne qui n'est pas exactement parallèle à l'équateur, et qu'on appelle ligne *isotherme* de 10° 8. M. de Humboldt à qui l'on doit l'idée des lignes isothermes a tracé de mêmes celles de 0°, de 10°, de 20°, etc. Celle de 27° 5' coïncide avec l'équateur; les autres, au lieu d'être parallèles, se relèvent vers le nord en approchant du méridien qui passe par le milieu de l'Afrique; tandis qu'elles s'abaissent vers le méridien qui passe par le milieu de l'Océan Pacifique pour se relever encore près des côtes occidentales de l'Amérique. On voit par là que la présence des terres augmente la chaleur; aussi, à latitude égale, l'hémisphère austral est-il plus froid que le nôtre. Dans la nouvelle Géorgie et dans les îles Sandwich par 54 et 58° les neiges sont déjà perpétuelles au niveau de la mer.

Lignes isothères, isochimènes.

885. On pourrait se faire une fausse idée de la température d'un lieu si on ne considérait que la température moyenne de l'année entière; car on conçoit qu'une égale quantité de chaleur annuelle puisse être très inégalement répartie entre les diverses saisons. De là l'idée des lignes *isothères*, ou d'égal été, et des lignes *isochimènes*, ou d'égal hiver. Ces lignes s'écartent encore plus des parallèles géographiques que les lignes isothermes; car, par exemple, l'été est tout aussi chaud à Moscou qu'à Nantes, quoique Moscou soit de 11° plus au nord.

La différence de l'été à l'hiver est si petite pour certains lieux, que la température y est presque constante. Ainsi, à Funchal (Madère), la température moyenne de l'été est de 24°, et celle de l'hiver est encore de 17, 8°. A Paris, au contraire, du mois le plus chaud au mois le plus froid, la différence va jusqu'à 15° 8' à Londres, c'est 16° 2; de sorte

que, pour ces deux points, le climat est très variable. Il l'est encore plus à New-Yorck et à Pékin, où les différences dépassent 30°, comme on le voit par le tableau suivant :

	TEMPÉRATURE MOYENNE de l'année,	du mois le plus chaud,	le plus froid.
New-Yorck. . .	12°, 1	27°, 1	3°, 7
Pékin.	12, 7	29, 1	4, 1

886. Voici, pour quelques lieux remarquables, un tableau des températures moyennes donné par M. de Humboldt. Table des températures moyennes.

Lieux.	Latitude.		TEMPÉRATURE MOYENNE de l'année.	de l'hiver.	de l'été.
Cap Nord.	71°		0°, 0	4, 6	6°, 3
Pétersbourg.	59	56. . .	3, 8	8, 3	16, 7
Moscou.	55	45. . .	4, 6	11, 8	19, 5
Stockholm.	59	20. . .	5, 7	3, 6	16, 6
Copenhague.	55	41. . .	7, 6	0, 7	17, 0
Édimbourg.	55	57. . .	8, 8	3, 7	14, 6
Dublin.	51	25. . .	9, 5	4, 0	15, 3
Genève.	46	12. . .	9, 6	1, 5	18, 3
Londres.	51	30. . .	10, 2	4, 2	17, 3
Vienne.	48	12. . .	10, 3	0, 4	20, 7
Paris.	48	50. . .	10, 8	3, 7	18, 1
Amsterdam.	52	22. . .	10, 9	2, 7	18, 8
Bruxelles.	50	51. . .	11	2, 6	19, 0
Milan.	45	28. . .	13, 2	2, 4	22, 8
Rome.	41	53. . .	15, 8	7, 7	24, 0
Alger.	36	48. . .	21, 1	16, 4	26, 8
Le Caire.	30	2. . .	22, 4	14, 7	29, 5
La Havane.	23	10. . .	25, 6	21, 8	28, 5
Cumana.	10	27. . .	27, 7	26, 8	28, 7

887. D'après la marche des températures, à mesure qu'on s'approche du pôle, M. Arago a trouvé qu'au pôle même la température moyenne devait être d'environ — 25°. Température moyenne du pôle.

Température moyenne de la surface de la terre.

888. Il est possible qu'à une époque très reculée la température de la surface de la terre ait été beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est aujourd'hui; mais les recherches de M. Arago ont montré que, depuis 2,000 ans environ, il n'y avait point eu de changement notable. M. Libri, en discutant les premières observations thermométriques faites par les académiciens *del Cimento*, est parvenu à établir que la température moyenne de la Toscane n'avait pas varié d'un degré depuis 200 ans; ce qui montre que les causes accidentelles, comme le déboisement, ont eu beaucoup moins d'influence qu'on ne le croit généralement.

Température moyenne du globe.

889. Quant à la température moyenne de la masse du globe, on peut affirmer qu'elle n'a pas diminué d'un centième de degré depuis 2,500 ans; en effet, d'après le calcul de Laplace, s'il avait eu un pareil refroidissement, le rayon de la terre se serait raccourci d'un dix-millionième, et par suite la vitesse de rotation eût augmenté d'un cinquantième de seconde; or, nous avons déjà dit que la durée du jour n'avait pas varié de cette quantité (47).

CHAPITRE II.

CHANGEMENTS DE VOLUME.

§ Ier. *Dilatations.*

Dilatation des gaz et des liquides.

890. En général, les corps se dilatent par la chaleur et se contractent par le froid; les gaz surtout éprouvent des variations très considérables dans leur volume; viennent ensuite les liquides, puis les solides. On peut constater les dilatations de l'air avec le thermomètre de Drebbel (837); quant aux liquides, il suffit d'en faire une espèce de thermomètre. On voit alors leur volume varier continuellement avec la température, ainsi que nous l'avons constaté déjà pour le mercure et pour l'alcool.

891. Le *pyromètre métallique* montre très bien la dilatation en longueur qu'éprouvent les corps solides. Une tige de cuivre AB est fixée solidement en B ; son extrémité A peut pousser le petit bras d'un levier coudé dont le grand bras OH forme une aiguille qu'on voit marcher dès qu'on allume les lampes placées sous la tige. Quand on les éteint, l'aiguille revient peu à peu à sa place, ce qui montre que la barre reprend sa longueur primitive; elle la reprend bien plus si on la refroidit, par exemple, avec de l'eau. En faisant la même expérience sur différents métaux, on reconnaît que le zinc est le plus dilatable ; vient ensuite l'argent, le cuivre, l'or, le fer, et enfin le platine, dont l'allongement n'est pas même le tiers de celui du zinc.

Dilatation linéaire des solides.

Pyromètre métallique.

Fig. 296.

892. Pour montrer que la dilatation se fait en tous sens, on a une petite sphère, de cuivre par exemple, qui passe très juste dans un anneau quand elle est froide, et qui ne passe plus quand elle est chauffée.

Dilatation cubique.

Anneau de S'gravesande.

893. On reconnaît par cette expérience et quelques autres du même genre que les corps homogènes ne changent pas de forme en se dilatant; une sphère reste une sphère, un cube reste un cube ; de sorte que le même corps, à deux températures différentes, contitue deux polyèdres semblables dont les dimensions seules ont changé.

Les corps homogènes ne se déforment point en se dilatant.

894. Quant aux corps hétérogènes, la dilatation différente des différentes parties entraîne généralement un changement de forme. Comme application de ce fait, on peut citer le thermomètre de *Bréguet*, qui est une espèce de ruban métallique enroulé en hélice, formé de 3 lames très minces de platine, d'or et d'argent intimement unies; l'argent se dilatant plus que le platine, l'hélice se tord ou se détord par les changements de température. Elle est fixée par un bout, et de l'autre elle porte une aiguille qui marque sur un cadran les changements qu'elle éprouve. L'or, qui a une dilatation intermédiaire, prévient les déchirures qui se feraient si on n'employait que le platine et l'argent. Pour graduer l'instrument, on le met dans une étuve dont on fait varier graduellement la température, et on marque les positions de l'aiguille correspondantes aux indications d'un bon

Changement de forme des corps hétérogènes.

Thermomètre de Bréguet.

Fig. 297.

thermomètre à mercure. Le thermomètre de Bréguet qui se réduit en quelque sorte à une surface, a l'avantage d'accuser instantanément les changements de température. On lui donne quelquefois la forme d'une montre en le réduisant à une spirale plate ou à une portion de courbe; mais alors on agrandit les mouvements de l'aiguille par un petit engrenage. Le thermomètre de Régnier est encore fondé sur le changement de forme occasionné par la chaleur dans un système formé de deux métaux.

Thermomètre de Régnier.

Dilatation des cristaux.

895. Les substances cristallisées n'ont pas toujours une même dilatation en tout sens; ainsi M. Mitscherlich a constaté que les cristaux de spath d'Islande changeaient de forme par la chaleur; ils s'allongent proportionnellement plus dans le sens de l'axe que perpendiculairement à cette direction.

Dilatation des vases démontrée par l'expérience.

896. Quand on dilate la matière qui compose un vase, on ne voit pas d'abord si la cavité doit s'agrandir ou diminuer; dans la réalité elle s'agrandit, et on le prouve en montrant que la petite sphère dilatée (892) peut passer si on a soin d'échauffer l'anneau. Dans les laboratoires de chimie, quand on a de la peine à enlever un bouchon de cristal, on échauffe le goulot, soit avec des charbons, soit par le frottement avec une ficelle; le bouchon sort ensuite sans peine, pourvu que la chaleur n'ait pas pénétré jusqu'à lui. Voici encore une expérience qui prouve bien que la capacité d'un vase augmente avec la chaleur. On prend un petit ballon de verre qu'on remplit d'eau; à son col on ajuste un bouchon traversé par un tube étroit en faisant en sorte que le liquide s'élève à une certaine hauteur dans le tube; on a ainsi une espèce de gros thermomètre. Si on le plonge brusquement dans l'eau chaude, le niveau baisse tout à coup dans le tube, parce que le ballon se dilate et loge ainsi une plus grande quantité de liquide. Ensuite la chaleur passant dans l'eau, celle-ci se dilate à son tour, et comme elle se dilate plus que le verre, le niveau dans le tube s'élève plus qu'il n'avait baissé. On a des phénomènes inverses en plongeant l'appareil dans de l'eau froide, c'est-à-dire que le premier effet est un abaissement. On est

étonné en faisant ces expériences de la rapidité des changements.

897. On conçoit aisément que la capacité d'un vase doive s'agrandir quand les parois se dilatent, en observant que ces parois peuvent s'assimiler à une voûte décomposable en voussoirs. Ceux-ci se dilatent dans toutes les dimensions; or, dès que les voussoirs deviennent plus grands, la cavité qu'ils comprennent devient nécessairement plus grande. Dilatation des vases démontrée par le raisonnement.

898. On peut encore s'assurer par le raisonnement que la capacité d'un vase doit s'agrandir *précisément comme le volume qui la remplirait*, bien entendu que ce volume est supposé de la même matière que le vase. En effet, concevons deux plans AB, CD parallèles et tangents à une cavité de forme quelconque creusée dans un corps solide. Par la dilatation des parties solides AC, BD, ces deux plans s'écarteront précisément comme s'il n'y avait pas de cavité; donc pour celle-ci la dimension perpendiculaire aux plans s'agrandira comme s'il s'agissait d'un corps solide, et il en sera de même de toutes les autres dimensions, puisque la direction des plans est quelconque. Une cavité se dilate comme le volume qui la remplirait. Fig. 298.

899. Le verre, les pierres, la brique, etc., se dilatent moins en général que les métaux; cependant leur dilatation devient sensible dans bien des circonstances. Nous avons déjà constaté celle du verre (896). Bouguer, pendant son séjour au Pérou, observa que la chaleur du soleil faisait éprouver à un pavé de briques qui était dans la cour de sa maison une dilatation d'un tiers de ligne pour une largeur de 11 pieds. On sait que les poteries se fêlent quand on les chauffe brusquement ou inégalement; c'est évidemment parce que les dilatations ne peuvent pas se faire alors d'une manière uniforme; aussi un verre épais casse-t-il bien plus facilement au feu qu'un verre mince. Dilatation du verre, des pierres, etc.

M. Vicat a fait des observations très curieuses sur les changements que la température occasionne au pont de *Souillac*, sur la Dordogne. Ce pont est dirigé de l'est à l'ouest, de sorte qu'il a une face au nord et l'autre au midi. C'est sur celle-ci que les effets sont surtout marqués : ainsi,

dans les grands froids certains joints des pierres de la voûte s'entr'ouvrent, puis ils se resserrent quand il fait chaud.

Les pierres humides ou sèches se dilatent de même.

900. Un fait remarquable constaté par M. Destigny, c'est qu'une pierre humide ne se dilate pas plus qu'une pierre sèche; c'est du moins ce qu'il a trouvé pour la pierre de *Saint-Leu*, en ne dépassant pas 30° C. L'échantillon qui n'avait guère que 3 décimètres cubes avait été plongé toute une nuit dans l'eau et en avait absorbé (sans changer de dimension) plus de 1,100 grammes, c'est-à-dire plus du tiers de son volume.

Dilatation des substances organiques.

901. On a peu étudié la dilatation des substances organisées, qui d'ailleurs perdent de l'eau ou même se décomposent quand on vient à les chauffer. On sait que le bois, qui change si sensiblement de volume par l'humidité, n'éprouve par la chaleur qu'une dilatation presque nulle.

Substances qui se contractent par la chaleur.

902. Certaines substances, quoiqu'elles ne s'altèrent pas, se contractent au lieu de se dilater quand on les échauffe. On peut citer le butyrate de chaux. Nous avons vu aussi que l'argile (856) soumise à une haute température diminuait de volume sans rien perdre de son poids. Ce *retrait* de l'argile paraît dû à un commencement de fusion, d'où résulte un tassement plus exact des molécules. Nous savons que la diminution de volume persiste, de sorte que nous avons là un phénomène d'un genre particulier bien plutôt qu'une exception réelle. Mais l'eau en offre une véritable :

Marche d'un thermomètre à eau.

Fig. 299

Maximum de densité de l'eau.

Supposons un thermomètre rempli d'eau pure ; si le niveau est en M à la température de zéro, il descendra à mesure qu'on échauffera le liquide ; à 4° il sera le plus bas possible ; l'eau sera alors à son maximum de densité ; à partir de ce point il y aura toujours dilatation tant qu'on élèvera la température. On voit d'après cela qu'un thermomètre à eau donnerait des indications ambiguës entre 0 et 8° ; on serait obligé par exemple de l'échauffer un peu pour voir s'il marque 1° ou 7°, 2° ou 6°, etc. D'après les expériences de M. Erman fils, l'eau de mer n'a pas de maximum de densité au-dessus de son point de congélation.

Phénomènes qui résultent des dilatations.

903. Les changements de volume occasionnés par la chaleur donnent lieu à un grand nombre de phénomènes re-

marquables. Déjà nous avons vu que les montgolfières s'élevaient parce qu'elles renfermaient de l'air chaud, plus léger que l'air extérieur. Le tirage des cheminées, les courants d'air et presque tous les mouvements de l'atmosphère sont dus en définitive à la diminution du poids spécifique de l'air dilaté par la chaleur.

Courants dans les gaz.

904. On peut observer les courants que des dilatations inégales occasionnent dans un liquide, en exposant au soleil un vase de verre un peu profond, contenant de l'eau où l'on a mis quelques parcelles de poussière. Il se manifeste bientôt des courants ascendants le long de la partie échauffée, et descendants de l'autre côté. L'eau sur le feu présente ces courants d'une manière encore plus marquée: les particules du fond montent dès que leur dilatation les a rendues plus légères; d'autres descendent pour les remplacer. Ordinairement le courant descendant est au centre de la masse, parce que ce sont les parties voisines des parois qui s'échauffent de préférence.

Courants dans les liquides.

Les phénomènes se reproduisent en sens inverse quand on refroidit l'eau, du moins tant qu'on n'a pas atteint 4°; car alors, si le vase est posé sur de la glace, il y a des courants ascendants, comme quand il était sur le feu.

905. On observe dans les glaciers de la Suisse des trous très étroits et très profonds, remplis d'eau, qui s'agrandissent en profondeur bien plutôt qu'en largeur. Il est facile de concevoir par quel mécanisme ils se creusent : s'il y a un peu d'eau dans une cavité superficielle, cette eau doit marquer environ 0° dans la partie qui touche à la glace; mais à la surface, où elle reçoit les rayons du soleil, elle peut s'échauffer. Or, les molécules qui s'échauffent ainsi deviennent plus lourdes; elles doivent donc descendre, et leur chaleur, transmise ainsi au fond, y détermine peu à peu la fusion de la glace.

Puits des glaciers.

906. On conçoit maintenant comment certains lacs ont vers le fond une température qui diffère peu de 4°, puisque, dans une masse d'eau tranquille, c'est vers le fond que doivent se trouver les particules les plus lourdes.

Température des lacs.

907. Les dilatations des métaux sont tellement considé-

Dilatations des métaux

dans les constructions.

sidérables, et surtout se font avec tant de force, qu'on est obligé d'en tenir compte dans les constructions. Ainsi on a eu soin de laisser de petits intervalles entre les pièces de bronze qui forment l'hélice de la colonne Napoléon. Cette hélice a 813 pieds de développement, et si toutes les dilatations s'ajoutaient il y aurait, de l'hiver à l'été, des différences de 8 à 9 pouces dans la longueur. Quand on établit des tuyaux de conduite, on les ajuste de manière qu'ils s'engagent un peu les uns dans les autres, laissant ainsi du jeu pour la dilatation. On a soin de ne pas clouer en une seule pièce toutes les parties d'une grande toiture métallique. Lorsqu'on établit une grille on laisse le jeu convenable; sans quoi une porte qui fermerait bien pendant une saison ne pourrait plus fermer pendant une autre.

Marche irrégulière des horloges.

908. Mais c'est surtout dans les instruments de précision que les effets des dilatations se font sentir. Quand il fait chaud, le pendule qui règle une horloge s'allonge, et l'horloge se met à retarder; les montres éprouvent des effets analogues. Si on fait du feu dans une chambre, on voit le baromètre monter, sans cependant que la pression atmosphérique devienne plus forte; c'est seulement que la chaleur dilate le mercure, et qu'il faut une colonne plus haute de ce liquide, devenu plus léger, pour faire équilibre à la même pression. Il est vrai que si l'échelle qui mesure la colonne s'allongeait précisément comme elle, on pourrait encore lire l'indication exacte; mais il n'en est pas ainsi, et la dilatation toute différente de l'échelle amène une nouvelle cause d'erreur. On conçoit que les mesures de longueur, de capacité sont dans un état continuel de variation, et qu'il en est de même des choses que l'on mesure. Ainsi un hectolitre d'esprit-de-vin a notablement plus de valeur en hiver qu'en été, et on en tient compte aux barrières; cependant, en général, on peut supposer les mesures invariables; c'est seulement dans les recherches scientifiques que leurs variations ont de l'importance, et nous verrons bientôt comment on y a égard.

Erreur sur la hauteur barométrique.

Sur les mesures de longueur, de capacité.

Force de dilatation dans les gaz.

909. La force de dilatation due à la chaleur est bien ma-

nifeste dans les gaz et les vapeurs, puisque c'est elle qui produit les explosions des armes à feu et qui fait marcher les machines à vapeur. Dans l'air on peut la mettre aisément en évidence, en échauffant un peu le thermomètre de *Drebbel* (837); il est clair que la force élastique augmente, puisque le niveau descend. Pour avoir une idée de cette force, on n'a qu'à plonger dans de l'eau chaude le tube de *Mariotte* (508). Si l'on a soin d'ajouter du mercure pour que le volume reste le même, on trouvera que la force élastique est considérablement augmentée, car la colonne soutenue sera beaucoup plus haute. Nous verrons par la mesure des dilatations quel est l'accroissement de force qui résulte d'une élévation donnée de température. Cette force est assez considérable pour qu'il y ait quelques chances de succès à remplacer la vapeur dans les machines par de l'air chaud préalablement comprimé (940).

910. Les liquides acquièrent par la chaleur une force de dilatation telle, qu'il arrive un moment où les vases ne peuvent plus résister. Quand le mercure, dans un thermomètre, est monté jusqu'au haut du tube, le plus petit accroissement de chaleur fait casser l'instrument, et il en serait de même d'un vase beaucoup plus solide. La force de dilatation des liquides, bien qu'elle soit si grande, est restée jusqu'à présent sans emploi, parce que les changements de volume sont fort petits; mais peut-être l'acide carbonique, qui a une énorme dilatation, pourra-t-il fournir un nouveau moteur. Force de dilatation dans les liquides.

911. Certaines dégradations observées dans les constructions montrent avec quelle force les solides se dilatent par la chaleur : souvent des barres de fer scellées dans des pierres les écartent en se dilatant, ou les arrachent en se contractant. Voici d'ailleurs une expérience qui fait voir combien est grande la force qu'on développe dans les métaux par les changements de température. Il y avait au Conservatoire des Arts et Métiers, à Paris, une galerie dont les murs chargés du poids des étages supérieurs s'étaient déviés de leur aplomb, et tendaient à se renverser au dehors. Molard, directeur du Conservatoire, fit établir d'espace en espace Force de dilatation dans les solides.

des barres de fer qui traversaient la galerie près du plafond, sortant de chaque côté par des trous pratiqués dans les murs. Les bouts de ces barres étaient taraudés, et recevaient en dehors de larges écrous serrés avec force contre la muraille. On conçoit que cette disposition limitait déjà l'écartement. En chauffant les barres, on les força de s'allonger, ce qui permit de resserrer les écrous. Par le refroidissement le fer se contracta, malgré la résistance énorme qu'il avait à vaincre; de sorte que les murs se redressèrent d'une petite quantité. Chauffant ensuite les barres de deux en deux, on put resserrer encore les écrous, tandis que les barres froides maintenaient le rapprochement obtenu; et en continuant cette manœuvre, on parvint à remettre les murailles parfaitement dans leur aplomb.

Cette expérience montre directement la force de contraction; mais la force de dilatation est au moins égale, puisqu'elle est opposée et produit son effet.

Cause des dilatations.

912. La dilatation d'un corps ne vient pas de ce que la chaleur en s'y introduisant le gonfle, comme l'eau fait dans une éponge. Cette comparaison grossière n'expliquerait nullement les faits; on ne verrait pas pourquoi un litre d'eau se loge dans une pierre sans faire varier son volume, tandis qu'un peu de chaleur y produit une dilatation sensible. Le poids d'ailleurs ne change pas, de sorte qu'on n'a aucun droit d'assimiler ainsi la chaleur à un corps matériel et pesant. Pour se tenir dans le vrai, il faut reconnaître que la dilatation est due à un accroissement dans la force répulsive, que nous avons admise entre les molécules du corps.

Répulsion entre les corps contigus.

913. Cet accroissement de force répulsive ne se manifeste pas seulement entre les molécules d'un même corps; on l'observe aussi entre deux corps contigus. Ainsi, en échauffant l'appareil dont on se sert en optique pour le phénomène des anneaux colorés, et qui consiste en deux verres posés l'un sur l'autre, *Powel* a constaté un écartement très notable. *Addams* a obtenu aussi des signes bien évidents de répulsion entre les surfaces échauffées et certains corps pulvérulents. Par exemple, en mettant un peu de silice dans une capsule de platine au-dessus d'une lampe à

alcool, il a vu que la poudre acquérait en quelques secondes une mobilité extrême; le frottement était si faible que souvent la silice ne bougeait pas, quoiqu'on fit glisser le vase au-dessous. On a des phénomènes semblables avec la magnésie, le peroxide de manganèse, etc.; mais non pas avec l'alumine ni avec la litharge, du moins à la chaleur que peut donner la lampe. Ces exceptions s'accordent avec ce fait général, que les actions moléculaires dépendent de la nature du corps. M. Thilorier a observé une répulsion analogue entre l'acide carbonique solidifié par le froid et des surfaces prises à la température ordinaire. On sait depuis longtemps qu'une goutte d'eau roule sur une pelle de fer rouge sans la mouiller; ce qui montre combien la chaleur diminue l'attraction entre le métal et l'eau, qui se comporte alors comme le mercure sur du verre. A cause des variations de température, on conçoit que la répulsion doit être variable; aussi, dans un creuset chauffé au rouge une goutte d'eau présente des vibrations qui la font paraître dentelée sur les bords, les dentelures étant toujours au nombre pair comme les parties vibrantes des disques, ainsi que l'a observé M. A. Laurent. Dans tous les cas, le défaut de contact fait que l'évaporation est bien plus lente que si le vase était moins chaud. Nous citerons encore une expérience bien remarquable de *Trévelyan*, pour montrer la répulsion entre des métaux échauffés. Si sur un morceau de plomb on pose une masse de cuivre fortement échauffée, et d'une forme telle qu'elle ne touche que par un point, le plomb, au point de contact, s'échauffe, et la masse de cuivre se trouve soulevée d'une petite quantité. Pendant ce temps, la chaleur se répartit dans le plomb, de sorte que la répulsion diminue et que la masse se rapproche pour être repoussée de nouveau, et ainsi de suite. Ces alternatives se succèdent si rapidement, qu'il se produit un son ordinairement assez grave, mais qu'on peut rendre plus aigu en appuyant sur la masse de cuivre, ce qui limite les excursions. C'est même par le son qu'on a été averti du mouvement qui a lieu dans cette expérience.

§ II. *Mesure des dilatations.*

Difficulté des mesures. 914. Après avoir constaté les changements de volume produits par la chaleur, nous allons voir comment on les mesure. Remarquons d'abord que cette opération est fort délicate quand on veut y mettre de la précision, parce qu'il s'agit en général de quantités fort petites. Ainsi une barre de fer de 4 pieds, prise à la température de la glace, ne s'allonge pas même d'une ligne quand on la plonge dans l'eau bouillante. De plus, les appareils dont on se sert éprouvent souvent eux-mêmes des changements dont on est obligé de tenir compte; par exemple, si, pour mesurer la dilatation du mercure, je l'enferme dans un vase de verre, il faut que je tienne compte de la dilatation du vase, ou que je trouve le moyen d'éluder son effet.

Procédés de MM. Dulong et Petit. 915. Parmi les divers procédés imaginés pour mesurer les dilatations, nous indiquerons seulement ceux de MM. Dulong et Petit, parce qu'ils sont les plus parfaits.

Dilatation absolue du mercure. Fig. 300. Soit ABCD un tube recourbé rempli de mercure; on maintient la branche AB à 0° en l'entourant de glace fondante, et on porte CD à différentes températures en chauffant un vase rempli d'huile que cette branche traverse. Supposons qu'à 100° on trouve 56 centimètres pour la hauteur du mercure d'un côté, et seulement 55 de l'autre; on peut conclure que de zéro à 100° le mercure se dilate de $\frac{1}{55}$; c'est-à-dire qu'un litre de mercure pris à zéro deviendrait à 100° un litre plus $\frac{1}{55}$ de litre.

En effet, le mercure chaud est ici un liquide plus léger; et l'expérience prouve que, pour l'équilibre, les colonnes doivent être :: 56 : 55; mais ce rapport est indépendant de la forme du tube; il serait encore le même avec un tube cylindrique et invariable; or dans ce cas il est évident que la quantité dont le mercure s'élève représente la dilatation de toute la masse qui compose la colonne.

Remarque. 916. On ne voit pas précisément de quel point les hauteurs doivent être comptées dans cette expérience. Pour éluder la difficulté, on a choisi un tube de communication

très étroit et on a pris les hauteurs à partir de son axe qui était parfaitement horizontal. D'ailleurs, on s'est assuré que des différences de plusieurs dixièmes de millimètre dans la hauteur AB n'altéraient pas sensiblement le résultat.

917. Quand le mercure est contenu dans un vase ordinaire, sa dilatation paraît moindre parce que celle du vase en dissimule une partie. Pour avoir cette dilatation apparente dans le verre, on met du mercure dans un tube, de manière qu'il soit entièrement plein à 0°; supposons qu'en chauffant à 100° il en soit sorti un gramme, et que le reste pèse 65 gr., il est clair que quand tout est refroidi, le vide représente la dilatation des 65 gr.; mais ce vide logeait un gramme de mercure, ou la 65e partie du volume de ce qui reste, donc la dilatation pour l'unité du volume est $\frac{1}{65}$. Dilatation apparente dans le verre.

918. Le tube, pendant l'expérience, est plongé dans une auge remplie d'abord de glace pilée et fondante; on a ainsi la température 0°. Cette auge est placée sur un fourneau, de sorte qu'on peut porter l'eau jusqu'à l'ébullition. Il faut que le tube soit entièrement plongé; la pointe, qui d'ailleurs est très fine, sort seule du liquide. Manière de chauffer. Fig. 301.

919. Une cavité creusée dans du verre se dilate précisément comme le verre qui la remplirait (898); d'après cela imaginons une cavité d'un centimètre cube pleine de mercure à 0°. Nous savons par l'expérience précédente que si on porte la température à 100°, on trouvera $\frac{1}{65}$ pour la dilatation du mercure. Mais, sans la dilatation du verre, on aurait $\frac{1}{55}$; donc $\frac{1}{55}-\frac{1}{65}$ est la quantité dont se dilate un centimètre cube de verre en passant de 0 à 100°. Cette différence est $\frac{1}{387}$, parce que les véritables dilatations du mercure sont $\frac{10}{555}$ et $\frac{10}{648}$; nombres que nous avions simplifiés pour faciliter le raisonnement. Dilatation du verre.

920. Pour avoir la dilatation apparente d'un liquide, on opère comme avec le mercure; on trouve ainsi $\frac{1}{23}$ pour l'eau, $\frac{1}{9}$ pour l'alcool, etc. Si on veut la dilatation réelle, il faut ajouter $\frac{1}{387}$. Dilatation des liquides.

921. Pour les gaz, il y a quelques précautions particulières. Supposons le tube rempli d'air parfaitement sec à 0°; on Dilatation de l'air. Fig. 302.

le chauffera jusqu'à 100°; et alors, faisant plonger l'orifice dans du mercure, il se fera une absorption à mesure que l'appareil se refroidira. On déterminera exactement le poids du mercure absorbé après avoir eu soin de ramener l'appareil à 0° avec de la glace. On déterminera aussi le poids du métal qui, à cette même température, peut remplir le tube en totalité. Soient, par exemple, 374gr,742 et 1374gr,742, ces deux poids : la différence 1000 pourra représenter le volume à zéro d'une masse d'air capable de remplir le tube à 100°; de sorte que 374,742 sera la dilatation apparente (917) pour un volume égal à 1000. Pour un volume égal à l'unité, ce serait donc 0,374742; ajoutant $\frac{1}{387}$ ou 0,000258, qui est la dilatation du verre pour l'unité du volume, on a enfin 0,375 pour la dilatation réelle de l'air. Nous avons supposé que la pression atmosphérique ne variait pas pendant l'expérience; autrement le changement de volume ne serait pas entièrement dû au changement de température. Du reste, la loi de Mariotte permettrait de faire la correction.

Manière de remplir le tube d'air sec.

922. Nous avons dit qu'avant tout il était indispensable de remplir le tube d'air parfaitement sec; pour cela, après l'avoir effilé par les deux bouts, on le met en communication, d'une part avec la machine pneumatique, et de l'autre avec un tube de 6 à 7 décimètres rempli de fragments de chlorure de calcium. Quand on fait le vide, l'air afflue à travers le chlorure, qui lui enlève toute son humidité; il suffit d'entretenir ainsi le courant une ou deux minutes pour dessécher parfaitement l'intérieur du tube. On ferme ensuite une extrémité, et on courbe l'autre comme dans la fig. 300.

Dilatation des autres gaz. Loi de Gay-Lussac. Fig. 303.

923. On constate aisément que les autres gaz se dilatent exactement comme l'air, sans répéter pour chacun l'expérience précédente. Il suffit de faire passer un volume déterminé du gaz dans un tube gradué sur le mercure, et de mettre à côté un tube semblable contenant un pareil volume d'air. Plaçant l'appareil dans une étuve, on voit qu'en faisant varier la température les volumes restent constamment égaux.

924. MM. Dulong et Petit ont mesuré la dilatation du fer, en enfermant une tige de ce métal dans un tube rempli de mercure à zéro, ce qui donnait un appareil analogue à celui de la fig. 300. Chauffant à 100°, puis laissant refroidir, ils obtinrent, à cause du mercure sorti, un vide qui, avec la dilatation du verre, pouvait contenir les dilatations réunies du fer et du mercure restants. Par le poids du mercure sorti, et par son poids spécifique *à zéro*, il est facile de calculer le volume du vide à cette même température (136) : supposons-le de deux dixièmes de centimètre cube ; soit de même 30^{cb}, et 11^{cb}, les volumes du fer et du mercure restant ; la capacité du tube à zéro sera Dilatation du fer et du platine.

41$^{cb.}$,2 ; $\frac{41^{cb.},2}{387}$ sera sa dilatation à 100° (919) ; $\frac{11}{55}$ = 0,2 celle du mercure, et on aura

$$0,2 + \frac{41,2}{387} = 0,2 + x$$

x désignant la dilatation de 30$^{cb.}$ de fer. En en prenant la 30e partie, on aura la dilatation de l'unité de volume, et on trouve ainsi $\frac{1}{282}$ à très peu près. Le même procédé appliqué au platine donne $\frac{1}{377}$.

925. En général, dans les solides, on a plutôt besoin de connaître la dilatation en longueur que la dilatation *cubique* ou du volume entier ; mais, quand on connaît l'une, il est facile de calculer l'autre. En effet, la forme ne changeant pas (893), les volumes aux deux températures sont comme les cubes des dimensions homologues, c'est-à-dire qu'on a : La dilatation linéaire est le tiers de la dilatation cubique.

$$v : v' :: l^3 : l'^3.$$

Si nous considérons seulement l'unité de volume et l'unité de longueur, et si nous appliquons notre calcul au fer, la proportion deviendra

$$1 : 1 + \frac{1}{282} :: 1 : (1 + x)^3,$$

x représentant la dilatation *linéaire* du fer. De là on tire

$$\frac{1}{282} = 3x + 3x^2 + x^3,$$

ce qui montre que x n'est pas même le tiers de $\frac{1}{282}$; par conséquent x ne vaut pas $\frac{1}{70000}$; x^3 est encore plus petit; négligeant donc ces quantités, on a

$$x = \frac{1}{846};$$

et comme les dilatations des solides sont toujours très petites, on voit, en généralisant, que la dilatation linéaire est le tiers de la dilatation cubique.

Dilatation du cuivre. Pyromètre de Borda. Fig. 304.

926. Le procédé que nous avons indiqué pour mesurer la dilatation des métaux n'étant pas applicable à ceux que le mercure peut dissoudre, comme l'or, l'argent, le cuivre, etc. MM. Dulong et Petit les ont comparés au fer, à l'aide d'un appareil dont la première idée appartient à Borda. Dans une auge contenant un liquide dont on faisait varier la température, ils avaient établi deux règles parallèles et égales, l'une de fer et l'autre du métal qu'on voulait lui comparer. Ces règles étaient solidement réunies par un bout, de sorte que la différence dans l'allongement ne pouvait se manifester qu'à l'autre. Deux montants, implantés perpendiculairement sur les extrémités libres, sortaient de l'auge et se terminaient par deux petites règles parallèles aux grandes, portant des divisions. On notait les divisions qui coïncidaient à la température de 0, et l'on voyait à 100° de combien l'une avait dépassé l'autre. La différence venait uniquement de l'allongement des grandes règles, parce que tout le reste était du même métal. Or, sans mesurer, on sait que la règle de fer, qui avait 1200^{mm} à zéro, s'allongeait de $\frac{1200^{mm}}{846}$ en passant à 100°: le cuivre s'allongeait un peu plus; et l'excédant, ajouté à $\frac{1200^{mm}}{846}$ donnait évidemment sa dilatation totale, qu'on a trouvée ainsi être la 582e partie de la longueur à zéro.

927. *Lavoisier* et *Laplace* ont mesuré directement la dilatation linéaire d'un très grand nombre de métaux avec un appareil qui représentait en grand le pyromètre métallique (891). Les barres avaient 5 pieds de long; elles étaient plongées dans de l'eau dont on faisait varier la température de 0 à 100°; l'aiguille était remplacée par une lunette horizontale braquée sur une mire à 600 pieds de distance. Le grand bras du levier décrivait un arc de 744 lignes pour un déplacement d'une ligne seulement dans le petit bras. Celui-ci ayant environ 10 pouces, et l'allongement des barres ne dépassant guère 2 lignes, toute l'étendue des variations angulaires était comprise dans 1°; par conséquent l'arc décrit par le petit bras était sensiblement une ligne droite confondue avec l'allongement de la barre et se trouvait sa mesure exacte. Procédé de Lavoisier et Laplace.

928. Après avoir indiqué les procédés les plus parfaits pour mesurer les dilatations des solides, des liquides et des gaz, nous donnerons le tableau des résultats auxquels on est parvenu, tant par ces procédés que par d'autres moins parfaits, mais d'une exactitude suffisante pour les applications dans les arts. Tables de dilatation.

Dilatation absolue entre 0 et 100°.

Tous les gaz	0,375	=	$\frac{100}{267}$
Mercure	0,0180180	=	$\frac{10}{555}$

Dilatation apparente dans le verre.

Mercure	0,0154321	=	$\frac{10}{648}$
Eau	0,0433	=	$\frac{1}{23}$
Eau saturée de sel marin	0,05	=	$\frac{1}{20}$
Acide chlorhydrique (densité 1,137)	0,06	=	$\frac{1}{17}$
Acide sulfurique (densité 1,85)	0,06	=	$\frac{1}{17}$
Éther sulfurique	0,07	=	$\frac{1}{14}$
Essence de térébenthine	0,07	=	$\frac{1}{14}$
Huiles d'olive et de lin	0,08	=	$\frac{1}{12}$
Acide nitrique (densité 1,4)	0,11	=	$\frac{1}{9}$
Alcool	0,11	=	$\frac{1}{9}$

Dilatation linéaire.

Flintglass anglais	0,00081166	$= \frac{1}{1248}$
Verre en tubes	0,00086133	$= \frac{1}{1161}$
Platine	0,00088420	$= \frac{1}{1131}$
Palladium	0,00100000	$= \frac{1}{1000}$
Acier non trempé	0,00107880	$= \frac{1}{927}$
Fonte	0,00112500	$= \frac{1}{889}$
Fer	1,00118210	$= \frac{1}{846}$
Acier trempé et recuit	0,00123956	$= \frac{1}{807}$
Bismuth	0,00139167	$= \frac{1}{719}$
Or de départ	0,00146606	$= \frac{1}{682}$
Or au titre de Paris, recuit	0,00151361	$= \frac{1}{661}$
Or au titre de Paris, non recuit	0,00155155	$= \frac{1}{645}$
Cuivre rouge	0,00171820	$= \frac{1}{582}$
Bronze	0,00181667	$= \frac{1}{550}$
Cuivre jaune	0,00186870	$= \frac{1}{535}$
Argent	0,00190868	$= \frac{1}{524}$
Argent de coupelle	0,00190974	$= \frac{1}{524}$
Métal de télescope	0,00193333	$= \frac{1}{517}$
Étain de Malaca	0,00193765	$= \frac{1}{516}$
Étain de Falmouth	0,00217298	$= \frac{1}{462}$
Plomb	0,00284856	$= \frac{1}{351}$
Zinc	0,00294167	$= \frac{1}{340}$
Zinc martelé	0,00310833	$= \frac{1}{322}$

Ciment romain	0,00143
Certains grès	0,00117
Marbre blanc de Sicile	0,00110
Granit rouge	0,000897
Marbre de Carrare	0,000848
Autre variété	0,000654
Pierre de Saint-Leu	0,000649
Marbre de Solst	0,000568
Brique ordinaire	0,000550
Brique réfractaire	0,000493
Terre de pipe hollandaise	0,000457

Poterie de Wedgewood	0,000453
Marbre noir de Galway	0,000445
Pierre de Vernon-sur-Seine	0,000430
Marbre de Saint-Béat	0,000418

Les dilatations des matières pierreuses ont été mesurées par M. *Destigny* et par M. *Adie*.

929. Dernièrement M. Thilorier a reconnu dans l'acide carbonique liquéfié une dilatation vraiment énorme, car elle est bien plus grande que celle des gaz. Il a vu une colonne de 40mm enfermée dans un tube, prendre une longueur de 60mm en passant de 0° à 30°; dans ce cas, l'allongement d'une pareille colonne d'air ne serait pas de 5mm. M. Kemp a vu depuis l'acide sulfureux liquéfié se dilater de $\frac{1}{5}$ de son volume en passant de —10° à 100°. L'éther maintenu liquide, par la compression, se dilate aussi beaucoup plus que dans les circonstances ordinaires, de sorte que le phénomène paraît général pour les substances qu'on maintient liquides en les comprimant. Dilatation des gaz liquéfiés.

930. On a reconnu que le verre et les substances métalliques, ainsi que tous les gaz, se dilataient uniformément entre 0° et 100° du *thermomètre à mercure*; de sorte qu'on a exactement la dilatation pour 1° en prenant la 100e partie des nombres donnés par la table. Au-dessous de zéro, l'uniformité subsiste encore jusqu'aux environs de la congélation du mercure. Dilatation pour un degré. Cas où elle est uniforme.

931. Quant aux liquides, si on excepte le mercure, leur dilatation suit une marche très compliquée, elle n'est point du tout la même pour les différents degrés. Nous donnerons comme exemple la table du volume de l'eau à différentes températures, résultant des expériences de *Hallstrom* (947). On y prend pour unité le volume de l'eau à son maximum de densité. Elle n'est pas uniforme dans les liquides.

Volume de l'eau à différentes températures.

Température.	*Volume.*	*Température.*	*Volume.*
0°	1,0001082	15°	1,0007357
1	1,0000617	16	1,0008747

Température.	*Volume.*	*Température.*	*Volume.*
2	1,0000281	17	1,0010259
3	1,0000078	18	1,0011888
4	1,0000002	19	1,0013631
4,1	1,0	20	1,0013490
5	1,0000050	21	1,0017560
6	1,0000226	22	1,0019549
7	1,0000527	23	1,0021746
8	1,0000954	24	1,0004058
9	1,0001501	25	1,0026483
10	1,0002200	26	1,0029016
11	1,0002970	27	1,0031662
12	1,0003888	28	1,0034414
13	1,0004924	29	1,0037274
14	1,0006081	30	1,0040245

Mesure des dilatations au-delà de 100°.

932. Au-delà de 100°, la dilatation pour 1° du thermomètre à mercure change dans toutes les substances et même dans les gaz. Mais comme ceux-ci continuent à s'accorder entre eux, on prend leur dilatation pour mesure des températures. On a ainsi le thermomètre à air, qui n'est pas autre chose que l'appareil servant à mesurer la dilatation de ce gaz (921). On détermine avec cet instrument la dilatation qu'éprouve une masse d'air, dont le volume à zéro est l'unité, et qui passe de cette température à celle que l'on considère sans changer de force élastique. Ensuite, puisque par définition, une dilatation de 0,00375 répond à 1°, il ne s'agit plus, pour avoir la température, que de trouver combien la dilatation totale contient de fois 0,00375.

Thermomètre à air.

Comparaison avec le thermomètre à mercure.

933. Comme il est bien plus difficile de mesurer ainsi une température avec le thermomètre à air qu'avec le thermomètre à mercure, MM. Dulong et Petit ont construit, d'après leurs expériences, une table qui donne les indications de l'un, quand on connaît celles de l'autre. Il a fallu des expériences particulières pour tenir compte de la dilatation du verre au-delà de 100°.

Therm. à mercure.	Therm. à air.
— 36°	— 36°
0	0
100	100
150	148,70
200	197,05
250	145,05
300	292,70
360	350

934. MM. Dulong et Petit ont mesuré les dilatations du verre, du mercure et de plusieurs autres métaux, jusqu'à 200 et 300°, en employant une huile fixe au lieu d'eau dans les appareils dont nous avons parlé. Il résulte de leurs expériences que la dilatation pour 1° du thermomètre à air devient de plus en plus grande à mesure que l'on considère des températures plus élevées; chaque substance, du reste, suit une marche différente dans cet accroissement. Dilatations croissantes au-delà de 100°.

§ III. *Usage des tables de dilatation.*

935. Tant que la dilatation est uniforme, il y a une relation très simple entre le volume et la température. Prenons par exemple un litre d'air à 0°; nous savons qu'à 1° son volume sera $1^l + \frac{1}{267}$ de litre; à 2° $1^l + \frac{2^l}{267}$; et en général à $t°$, $1 + \frac{t}{267}$. Maintenant si nous avions supposé 2,3 litres, il est clair que, pour avoir le volume, il n'y aurait qu'à multiplier $1 + \frac{t}{267}$ par 2,3; de sorte qu'en désignant par V_0 le volume à zéro, par V_t le volume à $t°$ on a Relation entre le volume et la température.

$$V_t = V_0\left(1 + \frac{t}{267}\right).$$

936. La quantité $\frac{1}{267}$ qui est la dilatation de l'unité de volume pour 1°, s'appelle *coefficient de la dilatation*. Il est Coefficient de dilatation.

évident que la formule s'appliquerait à tout autre corps qu'à l'air, y mettant le coefficient convenable; pour le mercure, par exemple, on mettrait $\frac{1}{5550}$.

Ramener un volume à zéro.

937. Résolvons maintenant quelques questions avec cette formule :

1° On a recueilli 9 litres d'un certain gaz à 18°, on demande le volume à zéro. La formule devient

$$9 = V_0 \left(1 + \frac{18}{267}\right); \text{d'où } V_0 = 8^l,43.$$

Capacité d'un vase à différentes températures.

2° Calculer la capacité d'un vase de verre à 18°, sachant qu'à zéro elle est de $8^l,9956$. La capacité se dilatant comme le verre qui la remplirait (898) on a

$$V_t = 8,9956 \left(1 + \frac{18}{38700}\right) \text{ d'où } V_t = 9^l \text{ à très peu près.}$$

Calcul de la température par le volume.

3° A quelle température faut-il porter une masse d'air prise à zéro, pour doubler son volume? Soit 1 le volume primitif; V_t sera égal à 2, on aura donc

$$2 = 1\left(1 + \frac{t}{267}\right) \text{ d'où } t = 267,$$

comme cela était d'ailleurs évident.

Correction thermométrique.

4° Pour montrer comment on fait la correction thermométrique (859), supposons qu'un instrument marquant 80° était plongé seulement jusqu'au zéro, et admettons que la température de la tige, à partir de ce point, soit de 0°. Il est clair que le volume du mercure actuellement au-dessus de 0° représente la contraction qu'éprouverait le reste si on mettait l'instrument dans la glace fondante. Or, le volume d'une division est $\frac{1}{6480}$ du volume à zéro (930); si donc on ne considère que le mercure actuellement plongé, on a 6400 et 6480 pour les volumes à 0°, et à la température t que l'on cherche et qui sera dès lors donnée par l'équation

$$6480 = 6400\left(1 + \frac{t}{6480}\right).$$

Si la tige n'était pas à zéro, on l'y ramènerait aisément

par le calcul, pourvu qu'on connût sa température : qu'elle soit par exemple à 20°, on n'aura qu'à tirer V° de la formule

$$80 = V_o \left(1 + \frac{20}{6480}\right).$$

938. En raisonnant sur l'unité de longueur comme nous venons de le faire sur l'unité de volume, on arrive de même à la formule

Relation entre la longueur et la température.

$$L_t = L_o\,(1 + kt),$$

où L_o et L_t sont les longueurs réelles à 0° et à t° d'un même corps dont le coefficient de dilatation linéaire est k. On se servirait de cette formule pour calculer l'allongement qu'éprouvent les barres de fer employées dans les constructions, les chaînes d'un pont suspendu, etc. en passant d'une température à une autre.

939. Dans les mesures précises, la dilatation des règles métalliques qui portent les divisions peut évidemment occasionner des erreurs. Supposons qu'en opérant à 17° avec un mètre de cuivre jaune, on ait trouvé entre deux points donnés une distance de $760^{mm},8$, et calculons ce qu'on aurait eu à zéro. Il est clair que le nombre des millimètres serait double si, par le froid, leur longueur se réduisait à moitié; de sorte que ce nombre est en raison inverse de la longueur que prend le millimètre aux deux températures; on a donc

Corriger l'erreur due à la dilatation de l'unité de longueur.

$$760,8 : x :: 1 : 1 + \frac{17}{53500}$$

$$\text{d'où } x = 761^{mm},04.$$

On voit qu'en général, pour corriger une distance de l'erreur due à la dilatation de la mesure, il faut multiplier le résultat brut par $1 + kt$, t étant la température et k le coefficient de dilatation de la matière qui compose la mesure.

940. De ce que l'air pris à zéro se dilate de $\frac{1}{267}$ pour un degré et conserve cependant sa force élastique, on peut conclure que si on l'échauffait de 1° sans lui permettre de

Relation entre la force élastique d'un gaz et la température

se dilater, on augmenterait sa force élastique de $\frac{t}{267}$, de sorte qu'on a

$$F' = F. \left(1 + \frac{t}{267}\right).$$

Quoiqu'on n'ait pas fait d'expérience directe sur la dilatation des gaz très comprimés, on peut certainement employer cette formule dans des limites très étendues, et admettre, par exemple, qu'en chauffant à 267° de l'air comprimé à 5 atmosphères, on lui en donnera 10 de force élastique.

Relation entre la densité et la température.

941. Il y a aussi une relation très simple entre la densité et la température. Prenons encore l'air pour exemple; évidemment sa densité devient moitié moindre quand son volume devient double, c'est-à-dire que les densités D_o et D_t sont en raison inverse des volumes 1 et $1 + \frac{t}{267}$, qu'une même masse d'air présente aux températures de o° et de t°; on a donc

$$D_o : D_t :: 1 + \frac{t}{267} : 1.$$

Vitesse du son à différentes températures.

942. La mécanique rationnelle démontre, que pour avoir la vitesse du son dans l'atmosphère a une température donnée, il faut diviser la vitesse à zéro par la racine carrée de la densité de l'air à la température que l'on considère; la densité à zéro étant prise pour unité, on aura donc pour la vitesse à t°

$$333^m \sqrt{1 + \frac{t}{267}}$$

On trouve ainsi qu'à 16° la vitesse est de 341^m.

Expression générale du poids d'un litre d'air.

943. En se rappelant (515) qu'un litre d'air à zéro, sous la pression H millimètres, pèse $1^{gr},3 \times \frac{H}{760}$, et en observant que le poids spécifique est proportionnel à la densité, la proportion (941) donnera pour le poids d'un litre d'air, à une température quelconque, sous une pression quelconque

$$\frac{1^{gr},3 + \frac{H}{760}}{1 + \frac{t}{267}} = \frac{0,456\ H}{267 + t}.$$

944. Quand on a trouvé par expérience le poids d'un liquide ou d'un gaz remplissant à une certaine température un vase de capacité invariable, on peut calculer aisément ce qu'eût été ce poids à une température différente, en se fondant sur ce que les poids d'un même volume sont proportionnels aux densités. Supposons qu'un flacon de verre soit rempli à 20° par 100^{gr} de mercure; pour savoir ce qu'eut été ce poids à zéro, on n'a qu'à résoudre la proportion (941)

Ramener à zéro la pesée d'un liquide ou d'un gaz.

$$100 : x :: 1 : 1 + \frac{20}{5550}.$$

945. Soit 1 la capacité d'un vase de verre a 0°; à t° elle est $1 + \frac{t}{38700}$. Supposons qu'à cette température elle contienne 25 gr. d'un gaz ou d'un liquide quelconque, et admettons que le vase puisse descendre à zéro sans que la température de ce qu'il contient varie, nous n'aurions plus alors 25 gr., mais une quantité x plus petite qui sera donnée par la proportion

Corriger une pesée de la dilatation du vase.

$$x : 25 :: 1 : 1 + \frac{t}{38700}.$$

Car le poids du contenu est évidemment proportionnel à lacapacité.

946. En pesant de l'eau à différentes températures dans un flacon à l'émeri et en corrigeant le poids dans la proportion due à la dilatation du vase, on pourrait déterminer la densité de l'eau à différentes températures. *Hallstrom* a préféré pour cela se servir de la balance hydrostatique. Il cherchait le poids déplacé par une boule de verre plongée dans l'eau à différentes températures, et faisait sur le poids donné par l'expérience précisément la correction que nous

Densité de l'eau à différentes températures.

venons d'indiquer. Voici le tableau de ses résultats; la densité maximum est prise pour unité;

Température.	*Densité.*	*Température.*	*Densité.*
0	0,9998918	15	0,9992647
1	0,9999382	16	0,9991260
2	0,9999717	17	0,9989752
3	0,9999920	18	0,9988125
4	0,9999995	19	0,9986387
4,1	1,0	20	0,9984534
5	0,9999950	21	0,9982570
6	0,9999772	22	0,9980489
7	0,9999472	23	0,9978300
8	0,9999044	24	0,9976000
9	0,9998497	25	0,9973587
10	0,9997825	26	0,9971070
11	0,9997030	27	0,9968439
12	0,9996117	28	0,9965704
13	0,9995080	29	0,9962864
14	0,9993922	30	0,9959917

Calcul du volume.

947. La table des volumes (931) se déduit facilement de celle-ci, en observant que le volume est en raison inverse de la densité. Soit 1 le volume de l'eau à 4°,1, x son volume, à 10_o, on a

$$1 : x :: 0,9998497 : 1 \text{ d'où } x = 10002200.$$

Condition pour que la densité représente le poids spécifique.

948. Pour pouvoir passer immédiatement de la densité au poids spécifique (131), il faut, d'après la définition même du gramme, que l'eau qui sert de terme de comparaison dans la détermination d'une densité soit a 4°,1; car si elle étaità une autre température, on n'aurait pas le droit de dire que chaque gramme d'eau répond à un centimètre cube. Comme il serait très difficile d'opérer toujours à 4°,1 on opère à la température où l'on se trouve, et au moyen de la table des volumes (931) on calcule le poids qui serait contenu si l'eau était au maximum de densité, en observant que les poids sont en raison inverse des volumes. Si, par

exemple, un flacon renferme 32 gr. d'eau à 16°, on fera la proportion

Poids de l'eau contenue dans un vase au maximum de densité.

32 : x :: 1 : 1,0008747.

Avec la table des densités x serait donné par une division.

949. Nous sommes en état de voir maintenant comme on détermine une densité en ayant égard à la température. Prenons le mercure pour exemple ; après en avoir pesé ce qui peut remplir un flacon à l'émeri en opérant à une température quelconque, mais connue, on ramènera le poids à ce qu'il eût été, 1° si on avait opéré dans un vase à zéro (945) ; 2° si le mercure eût été à zéro lui-même (944). Ensuite on cherchera le poids de l'eau à 4°,1 (948) capable de remplir le flacon, supposé lui-même à zéro (945) ; le rapport des deux poids donnera la densité rigoureusement définie. On a trouvé ainsi pour le mercure 13,598. Si le mercure et l'eau se trouvaient à la même température, on conçoit qu'il serait inutile de ramener la capacité du vase à zéro ; d'ailleurs cette correction de la dilatation du vase est si petite dans les circonstances ordinaires, qu'on peut très bien la négliger.

Corrections thermométriques pour la densité des liquides.

950. Le procédé est exactement le même pour la densité de l'air par rapport à l'eau ; seulement les corrections sont encore plus nécessaires, parce qu'on opère dans des vases très grands, et que la densité du gaz varie considérablement avec la température ; nous avons vu précédemment (575) comment on avait égard à la pression. Quant à la densité des gaz par rapport à l'air, les poids seraient ramenés tous les deux à zéro (944), si la température était différente, et si elle était la même il n'y aurait aucune correction relative à la chaleur ; car, si l'air est 14 fois aussi lourd que l'hydrogène à 20°, il en sera de même à toute autre température, à cause de l'égalité parfaite de la dilatation (923).

Corrections thermométriques pour la densité des gaz.

951. Pour les solides, le procédé est un peu plus simple que pour les liquides, parce que les deux corps que l'on compare sont naturellement à la même température. Supposons, par exemple, qu'en opérant à 15, avec le flacon à l'émeri, la

Corrections thermométriques pour la densité des solides.

balance hydrostatique ou l'aréomètre de Nicholson, on ait trouvé 25 grammes pour le poids de l'eau déplacée par un morceau de cuivre; on calculera d'abord le poids (de cette même eau à 15°) qu'eût déplacé le cuivre supposé à zéro (945). Ce calcul se fait précisément comme s'il s'agissait d'un *vase*. Connaissant ainsi le poids de l'eau à 15° capable de remplir un certain espace, il sera facile de trouver ce qu'aurait été ce poids si l'eau eût été à 4°,1 (948).

Mesure exacte de la capacité d'un vase.

952. La connaissance de la densité du mercure à différentes températures donne un moyen extrêmement précis de mesurer la capacité d'un vase à une température quelconque t; un centimètre cube de mercure pèse alors (943).

$$\frac{13^{gr},598}{1+\frac{t}{5550}}$$

Il n'y aura donc qu'à chercher combien de fois ce poids est contenu dans le poids total qui remplit le vase. Il faudrait en général une erreur de plus de 13 milligrammes sur la pesée pour produire une erreur d'un millième de centimètre cube sur la capacité.

Corrections barométriques, 1o dilatation de l'échelle.

953. Pour que les hauteurs des baromètres pris à différentes températures soient comparables, il faut d'abord tenir compte de la dilatation de la règle avec laquelle on les mesure; nous avons vu comment on calculait le nombre de millimètres qu'on eût trouvé, si l'échelle eût été à zéro (939).

2o Dilatation du mercure.

954. La correction due à la dilatation du mercure est encore plus importante. Quand ce liquide se dilate, il devient plus léger, il en faut une colonne plus haute pour faire équilibre à la pression; de sorte que deux baromètres, l'un chaud et l'autre froid, donnent des indications différentes, bien que la pression de l'air soit la même. De là la nécessité de ramener toutes les observations à la même température; on a choisi naturellement celle de zéro.

Soit $761^{mm},04$ la hauteur observée à 17° et déjà corrigée de la dilatation de l'échelle; x celle qui aurait eu lieu avec du

mercure à 0°; les hauteurs nécessaires à l'équilibre étant en raison inverse des densités (557) (941), on a

$$761,04 : x :: 1 + \frac{17}{5550} : 1 ;\ \text{d'ou}\ x = 758^m, 62.$$

955. La formule barométrique telle que nous l'avons établie suppose l'air à zéro. Dans ce cas nous avons trouvé par exemple qu'il en fallait une colonne de $4196^m, 65$ pour faire équilibre à $0^m, 3018$ de mercure; mais il est évident que la colonne nécessaire à cet équilibre doit être plus haute si l'air est chaud, puisqu'alors il est plus léger. Soient t et t' les températures aux deux stations; on prend par approximation, la température moyenne $\frac{t+t'}{2}$ pour celle de la colonne entière. De plus, pour simplifier et tenir compte de la vapeur d'eau qui est dans l'atmosphère, on admet $\frac{1}{250}$ au lieu de $\frac{1}{267}$ pour coefficient de la dilatation de l'air. D'après cela la densité moyenne de la colonne froide étant 1, celle de la colonne échauffée sera

Correction de la formule barométrique.

$$\frac{1}{1+\frac{t+t'}{2\times 250}} = \frac{1}{1+\frac{2(t+t')}{1000}},$$

Maintenant les hauteurs z et Z nécessaires à l'équilibre étant en raison inverse des densités, on a

$$z : Z :: \frac{1}{1+\frac{2(t+t')}{1000}} : 1$$

d'ou $Z = z\left(1+\frac{2(t+t')}{1000}\right)$; et si on met pour z sa valeur (600) il vient

$$Z = 18393\left(1+\frac{2(t+t')}{1000}\right)\log.\frac{h_0}{h_1}$$

Pendule compensateur. Fig. 305. 956. Nous indiquerons encore, comme application remarquable des coefficients de dilatation, la manière ordinaire de corriger les changements produits par la chaleur sur les pendules qui règlent les horloges. Celles-ci retardent, comme on sait, quand la lentille descend par l'allongement de la tige. Pour prévenir cet inconvénient la tige T qui est en fer s'attache à la traverse supérieure d'un cadre dont les deux montants CC, qui sont en cuivre, s'implantent dans la traverse inférieure d'un second cadre dont les montants FF sont en fer. Nous supposerons d'abord l'appareil suspendu par la petite tige t. Il est clair que si la lentille descend par l'allongement du fer, elle remonte par la dilatation du cuivre ; il y aura compensation si

$$\frac{1}{846}\left(t+F+T\right) = \frac{1}{515}C\,;$$

c'est-à-dire si les longueurs des métaux sont en raison inverse des coefficients de dilatation. Or cela est impossible avec deux cadres ainsi disposés, puisque la longueur du fer est plus que double de celle du cuivre ; mais cela peut se faire en supprimant la traverse supérieure et en attachant les deux tiges $m\,n$ en $m'\,n'$ dans deux autres cadres où le cuivre, presque égal au fer, achèvera de remonter la lentille. La tige t qui suspend le tout est fixée sur le cadre extérieur. La compensation se finit par tâtonnement, en retouchant les tiges jusqu'à ce que l'horloge réglée par le pendule conserve la même marche dans un appartement très froid et dans une étuve à 30 ou 40°. Le problème est réellement plus compliqué qu'il ne paraît, parce que d'abord le centre de gravité de l'appareil s'élève à cause de la tige qu'on ajoute, et qu'ensuite ce qui doit être invariable dans le pendule composé, c'est la distance du point de suspension, non pas au centre de gravité, mais un certain point appelé *centre d'oscillation*, qui se trouve toujours au-dessous du centre de gravité, et plus ou moins loin, suivant la forme du pendule et le poids de ses différentes parties.

Compensa- 957. Quand le ressort spiral et le balancier HK (342),

qui règlent le mouvement dans une montre, viennent à se dilater, les oscillations se font plus lentement et la montre retarde. Mais on parvient à maintenir la durée des oscillations invariable en ajoutant au balancier deux lames courbes *ll* composées de deux métaux, comme dans le thermomètre de Bréguet (894), et terminées par deux petites masses *m m*. Le métal le *plus dilatable* étant en dehors, l'effet de la chaleur est d'augmenter la courbure de sorte que les petites masses sont raprochées du centre; ce qui tend à rendre l'oscillation plus rapide. En mettant les masses plus ou moins loin du bout des lames, on finit, à force de tâtonnements, par obtenir une compensation parfaite. tion dans les montres. Fig. 306.

CHAPITRE III.

CHANGEMENTS D'ÉTAT.

§ 1er. *Fusion et solidification.*

958. Quand on chauffe un morceau de plomb, on le voit passer par différents degrés de mollesse, puis enfin se liquéfier. Ce phénomène, mieux encore que la dilatation, montre combien la chaleur diminue la force attractive des molécules. Phénomène de la fusion.

959. A mesure qu'on a perfectionné l'art de produire et de concentrer la chaleur, la liste des substances fusibles s'est tellement accrue qu'on en est arrivé à regarder le phénomène de la fusion comme général. Maintenant on fond toutes les substances qui ne se décomposent pas par la chaleur; il n'y a guère que le diamant ou le charbon pur qui aient jusqu'à présent résisté. Il est général.

960. Chaque substance se fond à une température déterminée et toujours la même, de quelque manière qu'on applique la chaleur. C'est un fait que nous avons déjà re- Invariabilité du point de fusion.

reconnu pour la glace (840), et qui se vérifie pour un corps quelconque, si on a bien soin de prendre la température au moment où la fusion commence. Le point de fusion, à cause de son invariabilité, fournit même un très bon moyen de distinguer certaines substances.

961. *Table des points de fusion.*

	Thermomètre centigrade.
Glace	0°
Huile d'olives	4
Beurre	32
Suif	33
Blanc de baleine	45
Cire non blanchie	61
Cire blanchie	68
Phosphore	43
Beurre de cacao	40
Potassium	58
Sodium	90
Alliage de 1 de plomb, 1 d'étain, 2 de bismuth	94
Iode	107
Soufre	109
Camphre	175
Étain	228
Bismuth	246
Plomb	322
Zinc	374
Antimoine	425
Argent pur	999
Argent allié avec $\frac{1}{10}$ d'or	1048.

	Pyromètre de Wedgewood.
Argent	20°
Cuivre	27
Or	32
Cobalt	130
Acier	130

	Pyromètre de Wedgewood.
Fer pur	158
Nickel	160
Manganèse	160
Chrome	170

962. Le platine, le palladium, et quelques autres métaux, sont infusibles au feu de forge, mais on les fond avec des miroirs ardents ou le chalumeau à gaz (561). Il en est de même de la silice et de l'alumine, qui constituent les argiles *réfractaires*, et la plupart des pierres précieuses. Substances infusibles au feu de forge.

963. On profite quelquefois de la différence de fusibilité pour séparer diverses substances; ainsi on sépare le plomb du cuivre en chauffant l'alliage à un certain degré; le plomb s'écoule, et le cuivre reste en masse poreuse : ce procédé est connu sous le nom de *liquation;* il n'est pas généralement applicable, à cause de l'affinité plus ou moins forte qui réunit les deux métaux. Ainsi, par la *liquation*, on ne séparerait pas le plomb de l'argent. Applications. Liquation.

964. On fait avec le plomb, le bismuth et l'étain, des alliages qui fondent à différentes températures, depuis 100 jusqu'à 200° : par exemple, si, pour prévenir l'explosion, on veut que la température ne s'élève pas au-dessus de 150°, dans une chaudière à vapeur, on y ménage une *ouverture*, qu'on ferme avec une plaque d'alliage, en proportion convenable, pour se fondre à cette température. Pour qu'elle ne se déforme pas avant de se fondre, la plaque fusible est maintenue par une petite grille. Rondelles fusibles.

965. On n'a pas exactement déterminé la température à laquelle fondent les différents sels. En général la chaleur rouge est plus que suffisante; à cette température le nitre et même le sel marin coulent comme de l'eau. Quand on chauffe un sel qui contient de l'eau de cristallisation, du borax, par exemple, on le voit fondre d'abord dans cette eau, puis se dessécher à mesure qu'elle s'évapore; ensuite il fond par la chaleur seule; de sorte qu'on distingue la fusion *aqueuse* et la fusion *ignée*. Fusibilité des sels. Fusion aqueuse. Fusion ignée.

966. Ce qui jette quelquefois de l'incertitude sur le point Cause d'incertitude sur le point de fusion

de fusion, c'est que certaines substances se ramollissent peu à peu, et n'arrivent à la liquidité parfaite que par degrés insensibles.

Disparition de chaleur pendant la fusion.

967. Une circonstance bien remarquable qui accompagne toujours la fusion, c'est qu'il disparaît, pendant qu'elle s'opère, une quantité de chaleur très considérable. Qu'on mette un vase plein de glace sur un brasier ardent; on ne s'apercevra pas de la plus légère élévation de température jusqu'à ce que tout soit fondu; l'énorme quantité de chaleur fournie au vase, pendant une heure peut-être, aura complétement disparu, employée toute entière à fondre la glace sans élever la température. Chaque substance, suivant sa nature, exige ainsi une certaine quantité de chaleur pour passer de l'état solide à l'état liquide; nous verrons plus loin comment on peut mesurer cette chaleur, qu'on appelle *latente*.

Solidification.

968. Quand un métal fondu repasse à l'état solide, on a évidemment un phénomène du même genre que la congélation de l'eau; c'est toujours un effet de la diminution de chaleur. En général une substance se solidifie précisément à la température où elle commence à fondre. Ainsi un thermomètre marque le même degré dans l'étain quand il se prend en masse ou quand il entre en fusion. Cela se conçoit quand on observe que la température variant par degrés insensibles, la différence entre le point où l'eau est encore liquide et le point où elle commence à geler doit être plus petite que toute quantité assignable. Ainsi à zéro la glace fond ou l'eau gèle, suivant qu'on est dans une période croissante ou décroissante de température. D'après cela, la table des points de fusion donne la température où les substances fondues commencent à se solidifier; nous ajouterons seulement ici les points de congélation de quelques substances qui restent liquides au-dessous de zéro.

Température à laquelle elle s'opère.

Substances qui ne se congèlent qu'au-dessous de zéro.

969. Eau de mer	— 2° 5
Huile de navette	— 4°
— d'olive	— 6°
— de colza	— 6°

Huile d'amandes douces . . . . . . } — de térébenthine . . . . }	— 10°
— d'œillet.	— 18°
— de noix . . . } — de chenevis . } — de lin . . . }	— 27°
Mercure	— 39°
Acide carbonique	— 90°

970. Relativement aux huiles, nous remarquerons qu'elles commencent à s'épaissir bien avant de se solidifier : ainsi l'huile d'olives s'épaissit à + 4°; celle d'œillet à — 2°, celle de lin à —20°. Remarque.

971. Il y a un grand nombre de liquides qu'on n'a jamais pu congeler : tels sont l'éther, l'esprit-de-vin, etc.; mais l'analogie fait supposer que ces exceptions disparaîtraient si on avait les moyens d'abaisser à volonté la température. Liquides qui ne se congèlent pas.

972. Nous examinerons avec quelque détail la formation de la glace. Supposons que par une forte gelée on mette sur un support solide un vase contenant de l'eau parfaitement pure, avec un thermomètre plongé dans le liquide, et qu'on recouvre le tout d'une cloche pour éviter les mouvements de l'air; on verra l'eau descendre à—5 ou —6° sans se geler. Dans des tubes étroits, où il ne peut guère s'établir de mouvement, l'eau reste liquide à plusieurs degrés au-dessous de zéro, ainsi que cela résulte des expériences de M. Desprets; cela explique en partie comment les substances organisées résistent souvent à la gelée. M. Gay-Lussac, ayant eu la précaution de recouvrir d'une couche d'huile l'eau contenue dans un vase, l'a vue encore liquide à — 11°. Quand l'eau est ainsi liquide au-dessous de zéro, le moindre choc suffit pour déterminer instantanément la congélation d'une partie de la masse. Blagden, qui a le premier observé ce phénomène, ayant pris le vase pour le transporter, vit l'eau se geler tout à coup par l'agitation que lui donna un faux pas. Cependant une agitation brusque réussit moins bien qu'une vibration

Circonstances de la congélation de l'eau.

Eau liquide au-dessous de zéro.

produite dans le vase par un léger choc. On produit encore immédiatement la congélation en mettant un petit glaçon dans le liquide. L'eau un peu sale se gèle précisément à zéro, parce que les corps qu'elle tient en suspension s'y déplacent pendant les changements de densité.

Production de chaleur pendant la congélation.

973. Un fait bien remarquable, c'est que dans cette expérience le thermomètre remonte à zéro à l'instant où l'eau se gèle, de sorte que le point de congélation reste réellement à zéro. Mais en outre ce phénomène montre qu'il se produit de la chaleur pendant la congélation; et on peut encore en avoir la preuve en mettant dans de l'eau à zéro un morceau de glace refroidi à — 20° par exemple; on le verra se recouvrir de nouvelles couches de glace et en même temps se réchauffer jusqu'à zéro. D'ailleurs cette production de chaleur, par le fait même de la solidification, a lieu dans les circonstances ordinaires. On sait très bien que de l'eau exposée à une forte gelée ne se prend pas instantanément et en entier dès qu'elle est arrivée à zéro; la chaleur dégagée par les parties qui se gèlent entretient la fluidité du reste; et c'est ainsi qu'on s'explique comment, par un froid de plusieurs degrés au-dessous de zéro, la masse puisse se maintenir à zéro pendant des heures entières, c'est-à-dire pendant tout le temps que dure la congélation. Nous voyons donc reparaître lors du passage à l'état solide la chaleur qui avait disparu dans le passage à l'état liquide (967). C'est d'ailleurs un phénomène général comme nous le reconnaîtrons en mesurant la chaleur que les différentes substances dégagent dans ce cas.

Cristallisation de l'eau.

974. Quand la congélation marche avec lenteur, on la voit se faire d'abord à la surface et près des parois. De longues aiguilles cristallines s'étendent ensuite en s'entrecroisant dans le liquide, donnant naissance à d'autres aiguilles qui naissent des premières sous un angle de 60°. C'est en se groupant ainsi, avec une certaine régularité, que les molécules d'eau prennent l'état solide.

Dilatation pendant la congélation.

975. Par cette nouvelle disposition, le volume de la masse augmente, et même, comme la dilatation se manifeste à partir de + 4° (902), il faut admettre que les molé-

cules commencent dès lors à se grouper comme elles doivent l'être à l'état solide. Souvent au milieu de la surface qui est gelée il reste une ouverture par où le liquide intérieur déborde, ce qui est un effet évident de la dilatation; si ce trou se ferme trop tôt, la croûte déjà glacée se fend avec bruit; ou si on la perce avec une épingle on voit le liquide jaillir quelquefois à plusieurs pouces. La dilatation totale de la glace sans bulles d'air est de $\frac{1}{13}$ environ, comme on peut s'en assurer en observant que le volume d'un gramme de glace $= \frac{1}{0,93}$ et surpasse par conséquent de $\frac{1}{13}$ celui d'un gramme d'eau (136). Quant à la densité elle se mesure à l'aide du flacon à l'émeri; l'eau qui sort a bien le même volume que la glace, car celle-ci n'a pas le temps de fondre pendant qu'on la plonge. Le vide restant après la fusion donnerait directement l'accroissement de volume. Observons d'ailleurs qu'on n'a pas besoin d'expériences précises pour savoir que la glace est plus légère que l'eau, puisqu'on la voit toujours flotter sur ce liquide. L'accroissement de volume est aussi bien évident par la forme bombée que prend la surface de l'eau qui se gèle dans un vase. Au reste l'eau n'est pas la seule substance qui se dilate en se solidifiant. La fonte, le bismuth présentent le même phénomène; c'est même pour cela que la fonte peut se mouler aussi exactement, et que le bismuth coulé dans un tube de verre le brise au moment où il se solidifie. Densité de la glace.

976. La dilatation de l'eau quand elle se gèle se fait avec une force vraiment énorme; des canons de fusil exactement remplis d'eau et bien fermés, étant exposés à la gelée, sont fendus infailliblement. Hales ayant rempli d'eau une bombe de plus d'un pouce d'épaisseur et l'ayant fermée avec un bouchon maintenu par toute la force d'un pressoir, l'entoura de glace pilée et de sel pour produire la congélation; il opérait d'ailleurs par une forte gelée. La bombe se fendit en trois morceaux par l'effort de la glace qui cependant n'avait encore que 3/4 de pouce d'épaisseur. Dans l'Amérique du Nord, où on avait fait des expériences analogues par un froid de $-20°$, les tampons sautèrent avant Force de dilatation.

que tout fût gelé, et l'eau qui les poussait forma un mamelon de glace saillant à l'orifice. On avait pensé d'après cela que peut-être l'eau ne pourrait pas se geler si on l'empêchait de se dilater, mais on n'a pas le droit de tirer cette conclusion. Du reste on n'est pas surpris après ces expériences de voir les vases remplis d'eau, et qui ont un goulot étroit, se casser par la gelée ; cela arrive même quand on les laisse ouverts, parce que la glace qui se produit d'abord dans le goulot ferme réellement le vase. Certaines pierres qu'on appelle *gelives* se fendillent quand l'eau qu'elles ont absorbée se gèle. Uue dissolution de sulfate de soude qu'on fait pénétrer dans les pores de ces pierres produit le même effet en cristallisant ; cela fournit un moyen de reconnaître les pierres gelives.

Pierres gelives.

Désorganisation des tissus végétaux et animaux.

977. On conçoit que le tissu des plantes et des fruits plus ou moins pénétré de liquides puisse se déchirer par l'expansion de petits glaçons qui s'y forment ; et on se rend ainsi compte de la désorganisation qui suit la gelée. La même chose doit arriver dans un membre gelé, car l'eau y forme au moins les 0,9 du poids des liquides. Cependant la vie peut s'y rétablir si on a soin de ne le réchauffer que par degrés en le frottant d'abord avec des corps très froids, même avec de la neige.

Séparation de l'air pendant la congélation de l'eau.

978. Les glaçons présentent presque toujours des bulles, ce qui montre que l'air en dissolution dans l'eau s'en sépare au moment où elle passe à l'état solide. Ces bulles, quelquefois très volumineuses, contribuent certainement à la dilatation, mais elles n'en sont pas la seule cause puisqu'on l'observe dans de l'eau bouillie et parfaitement purgée d'air.

L'eau sans air gèle moins vite.

La dilatation de $\frac{1}{14}$ que nous avons reconnue se rapporte à l'eau sans air ; avec de l'air elle peut aller à $\frac{1}{9}$. *Black* a constaté que l'eau contenant de l'air gelait plus vite que l'eau bouillie, mais celle-ci gelait aussi vite dès qu'il l'agitait seulement avec un cure-dent.

Séparation de certains sels.

979. Certains sels se séparent aussi de l'eau pendant la congélation ; aussi dans les pays très froids, pour obtenir le sel marin, on fait arriver l'eau de la mer dans des bassins peu profonds, où le liquide se divise en deux parties, l'une

qui gèle, c'est de l'eau presque pure, l'autre qui est une dissolution saturée qui ne gèlerait guère qu'à — 20° et dont on retire le sel en chassant l'eau par l'évaporation.

980. L'eau mêlée avec 12 ou 15 centièmes d'alcool se sépare également en deux parties par le froid, une partie aqueuse qui gèle et une partie spiritueuse qui reste fluide. Aussi, quand on perce la glace qui s'est formée à l'intérieur d'un tonneau pendant la gelée, le vin qui s'écoule est-il beaucoup plus fort; mais en revanche ce qui reste ne contient plus que très peu d'alcool. Séparation de l'alcool.

981. Toutes choses égales, l'eau gèle d'autant plus difficilement qu'elle est plus profonde; ainsi, une faible gelée fait prendre une mare avant qu'il y ait encore de glace sur un étang, ni, à plus forte raison, sur un lac ou sur la mer. Cela provient de ce que les molécules de la surface, qui sont les premières à se refroidir, ne restent pas au-dessus, mais descendent, parce qu'elles deviennent plus lourdes (902). D'autres moins froides les remplacent, et, s'il s'agit d'eau douce, ces courants ascendants et descendants durent tant que la masse n'a pas atteint la température de 4°, ce qui demande un temps très long quand la profondeur est un peu grande. Dans l'eau de mer, les courants continuent jusqu'à la température de la congélation (902), de sorte que celle-ci doit se faire encore plus tard à profondeur égale; mais de plus l'agitation contribue à répartir le refroidissement dans toute la masse. C'est cette dernière raison qui fait que les rivières gèlent plus tard que les eaux stagnantes; les couches superficielles, continuellement brisées par le courant, n'ont pas le temps de se refroidir isolément; la congélation ne peut guère commencer avant que la masse entière soit descendue à zéro. Les eaux profondes gèlent difficilement. Il en est de même des eaux en mouvement.

982. Dans les eaux tranquilles les premiers glaçons se forment à la surface à une époque où les couches inférieures sont encore à 2 ou 3° au-dessus de zéro. Dans les rivières, la congélation commence ordinairement près des bords où l'eau est moins profonde et moins agitée; mais précisément à cause de l'égalité de température due à l'agitation, la glace, dans le courant proprement dit, peut se for- Dans les eaux tranquilles la glace se forme à la surface.

mer à une profondeur quelconque, et particulièrement sur le fond où les inégalités déterminent en quelque sorte la cristallisation. Là d'ailleurs le mouvement est moins rapide, de sorte que les cristaux peuvent se réunir plus facilement. Les glaçons ainsi formés sont ordinairement en masse spongieuse plus ou moins adhérente au gravier, aux plantes, etc. Quelquefois, en remontant à cause de sa légèreté, cette glace entraîne les corps sur lesquels elle était fixée. On a vu des chaînes, depuis long-temps tombées au fond de l'eau, être ainsi ramenées à la surface. Les glaçons qu'une rivière charrie et qui proviennent soit du fond, soit du bord d'où le courant les a détachés, s'accroissent comme les cristaux qu'on met dans une dissolution saline; ils se soudent en déterminant la solidification des parties intermédiaires; aussi la glace des rivières n'est-elle jamais unie comme celle d'une eau tranquille.

Dans les rivières elle peut se former au fond.

983. Les neiges perpétuelles sont quelquefois situées de manière qu'elles se ramollissent et s'impreignent d'eau pendant les journées chaudes de l'été; elles reprennent ensuite de la solidité; c'est ainsi que les glaciers se forment. Lorsque ces amas de glace sont placés sur un terrain déclive, leur propre poids leur donne un mouvement lent, de sorte qu'ils se prolongent souvent bien au-dessous des limites des neiges perpétuelles.

Glaciers, leur origine.

984. Pour donner une idée de la solidité de la glace, on peut citer l'histoire du palais construit à Pétersbourg en 1740 avec des glaces tirées de la Newa. Devant ce palais étaient des canons également en glace; chargés de 3 onces de poudre, ils lançaient, sans éclater, des boulets capables de percer à 60 pas une planche épaisse de 2 pouces. L'épaisseur des canons était de 4 pouces.

Solidité de la glace.

§ II. *Formation et liquéfaction des vapeurs.*

985. La plupart des corps se transforment en gaz quand on les chauffe. Pour voir bien nettement ce phénomène, prenons un tube semblable à celui dont on se sert pour établir la loi de Mariotte, mais rempli de mercure de A en B.

Expérience qui met en évidence la vapeur et ses principales propriétés. Fig. 307.

Entre le mercure et le verre en A, se trouve emprisonnée une goutte d'éther, liquide très facile à vaporiser; si nous plongeons cet appareil dans de l'eau chaude, nous verrons tout à coup l'éther se transformer en un gaz qui, par sa force élastique, refoulera le mercure jusqu'en A', soutenant la colonne A' B', et la pression de l'atmosphère. En secouant le tube nous reconnaîtrons que ce gaz est élastique comme l'air; il est d'ailleurs transparent et invisible comme lui, mais il en diffère en ce qu'il se réduit à un liquide dès qu'on lui enlève de la chaleur en plongeant, par exemple, le tube dans de l'eau froide, ou, dès qu'on le comprime, en versant une certaine quantité de mercure dans la longue branche.

986. En physique on donne le nom de *vapeurs* aux gaz qu'on peut ainsi liquéfier aisément par la compression ou par le froid. Les vapeurs ont donc la même transparence que les gaz et comme eux ne sont visibles que quand elles sont colorées; ainsi on voit la vapeur d'iode qui est violette, celle de brôme qui est orangée; mais on ne voit pas la vapeur d'eau. **Définition de la vapeur.**

987. Dans le langage ordinaire on entend par vapeur quelque chose de visible et qui ressemble à de la fumée, mais la distinction est facile. Ainsi la matière des brouillards et des nuages, qui est toujours visible et plus ou moins opaque, n'est point une véritable vapeur, c'est un amas de vésicules infiniment petites formées par de l'eau liquide comme les bulles de savon. Par extension, on donne à cet assemblage de vésicules le nom de vapeur vésiculaire. L'eau prend presque toujours cette disposition au moment où on liquéfie la vapeur mêlée d'air. Nous verrons, en parlant de l'arc-en-ciel, un moyen très simple de s'assurer que l'eau ne forme pas alors de petites gouttes solides. **Vapeur vésiculaire.**

988. La température à laquelle commence la vaporisation n'est pas la même pour les différentes substances : à 0° l'acide sulfurique concentré n'émet pas encore de vapeurs, on peut s'en assurer en suspendant au-dessus de l'acide un peu de baryte qui reste pure tant que le thermomètre ne **Température de la vaporisation pour liquides.**

s'élève pas beaucoup au-dessus de zéro. A cette température le mercure se vaporise déjà, car une feuille d'or suspendue au-dessus du métal est, au bout de quelque temps, blanchie par sa vapeur; il faudrait maintenir la température à —10° environ pour qu'il n'y eût pas de vaporisation. A la température ordinaire la plupart des liquides se vaporisent; cela est évident pour l'eau que nous voyons continuellement diminuer dans les vases ouverts, de même pour l'alcool, la plupart des acides, l'éther, les huiles essentielles ainsi reconnaissables par leur odeur. Les huiles fixes exigent une température plus élevée, qui d'ailleurs les décompose en partie.

Substances qui se volatilisent avant de fondre.

989. Plusieurs substances solides se vaporisent très bien dans les circonstances ordinaires; ainsi du camphre mis à l'air a bientôt disparu; si on le conserve dans un flacon il se sublime à la partie supérieure. La glace même dans les plus grands froids diminue par l'évaporation; l'iode et l'arsenic se volatilisent aussi bien avant de fondre. Il est probable que l'odeur de certains corps, quand on les frotte ou quand on les chauffe, provient d'un commencement de volatilisation; le soufre et plusieurs métaux sont dans ce cas.

Relation entre la fusibilité et la volatilité.

990. Ordinairement les substances les plus fusibles sont celles qui se volatilisent le plus facilement; mais il y a des exceptions. Ainsi, par exemple, l'étain qui fond si vite reste fixe à la chaleur blanche, tandis que le zinc, bien plus difficile à fondre, peut être distillé à cette température.

Métaux volatils.

991. Voici la liste des métaux qu'on a volatilisés.

Mercure à 0°.
Arsenic vers 180°.
Cadmium, Tellure — vers 360°.
Potassium, Sodium — à la chaleur rouge.
Zinc à la chaleur blanche.
Plomb, Bismuth, Antimoine, Argent — *idem*, mais plus difficilement que le zinc.

Or
Platine } Au foyer d'un miroir ardent.

992. Les autres métaux sont fixes ou n'ont pas été encore convenablement essayés à cause de leur facilité à s'oxider; mais on peut citer comme substances absolument fixes, à la plus haute températnre qu'on ait pu produire, l'alumine, la silice, le carbone, etc. Substances fixes.

993. En revanche il y a des gaz qu'on n'a jamais pu amener à l'état liquide ni par le refroidissement ni par la compression; tels sont l'oxigène, l'hydrogène, l'azote, l'air, etc. Nous avons donné la liste des gaz qu'on était parvenu à liquéfier (516). La pression joue un grand rôle dans cette liquéfaction; cependant, dans quelques cas au moins, le refroidissement seul suffit; ainsi l'acide sulfureux reste liquide sous la pression ordinaire à la température de — 10°. Gaz permanents. Gaz liquéfiés.

994. La différence de volatilité s'emploie très souvent pour séparer les diverses substances; ainsi pour purifier le zinc, on le met dans une cornue de grès ou de fonte, qu'on chauffe jusqu'au rouge blanc; les vapeurs viennent se condenser dans le col, et le métal pur coule goutte à goutte. On opère de même pour séparer le mercure de l'étain ou de tout autre métal peu volatil. Mais la distillation s'emploie surtout pour les liqueurs spiritueuses et pour les huiles essentielles. On se sert alors d'un *alambic*, appareil formé de trois parties principales, la *cucurbite* A, le *chapiteau* B et le *serpentin* C. Supposons qu'on mette du vin dans la cucurbite; l'alcool qui entre dans sa composition, étant plus volatil que l'eau, s'élèvera en vapeurs dès qu'on chauffera; ces vapeurs rempliront successivement le chapiteau et le serpentin, mais là elles seront ramenées à l'état liquide à cause de l'eau froide qui baigne le tube, de sorte que l'alcool s'écoulera en *d*. Il ne faut pas croire cependant qu'on obtienne ainsi de l'alcool pur, car de l'eau se volatilise avec lui; on aura même, par cette première distillation, plus d'eau que d'alcool, parce que dans le vin il y a bien moins d'alcool que d'eau et que la Applications, distillation. Alambic. Fig. 108.

quantité compense la moindre volatilité. Mais en distillant le premier produit on en obtient un second plus riche en alcool; cependant pour avoir de l'alcool absolu on est obligé de retenir l'eau à l'aide du chlorure de calcium.

Pour entretenir fraîche l'eau du serpentin, on verse de temps en temps de l'eau froide par l'entonnoir *f*, qui plonge jusqu'au fond du vase; l'eau chaude plus légère gagne la partie supérieure et s'écoule par le robinet *g*.

Bain-marie. 995. On appelle *bain-marie* un vase ordinairement en étain, qui entre exactement dans la cucurbite; il est baigné par l'eau bouillante dont la vapeur sort en *a*; on y met les substances qui pourraient être altérées par l'action directe du feu. On fait aussi une espèce bain-marie avec un double fond percé de trous qu'on établit dans le cucurbite même, au-dessus de l'eau. C'est sur cette espèce de grille qu'on pose les plantes aromatiques dont on veut obtenir les eaux distillées. La vapeur de l'eau bouillante passant, par exemple, à travers une couche de fleur d'oranger volatilise l'huile essentielle, et va se condenser avec elle dans le serpentin; c'est l'eau chargée ainsi de l'odeur qui prend le nom d'eau de fleur d'orange.

Disparition de chaleur pendant la vaporisation. 996. Avec un appareil distillatoire on peut aisément constater deux faits capitaux dans l'étude de la chaleur. A partir du moment où l'eau est à 100°, le charbon qu'on brûle pendant des heures entières n'élève pas sa température d'un seul degré. Toute la chaleur qu'on lui donne est absorbée pour changer son état, car la vapeur est à 100° comme le liquide. Mais l'énorme quantité d'eau qu'il faut employer et continuellement renouveler pour maintenir le serpentin froid montre que la chaleur reparaît quand la vapeur se liquéfie; nous verrons dans la mesure de la chaleur que 10 livres de vapeur d'eau à 100° peuvent, en se condensant, porter à cette même température plus de 50 livres d'eau froide.

Réapparition pendant la liquéfaction.

Vaporisation dans le vide. 997. Il est évident que quand l'ébullition dure depuis quelque temps l'air se trouve chassé de l'alambic, d'où l'on peut conclure que l'air n'est pas nécessaire à la formation de la vapeur. Autrefois on le croyait l'agent essentiel de la

vaporisation, du moins dans les circonstances ordinaires, c'est-à-dire quand on n'employait pas la chaleur artificielle; mais il est facile de prouver que l'eau et à plus forte raison l'alcool, l'éther, etc., se vaporisent dans le vide le plus parfait et par la température la plus basse. Si on souffle avec un tube recourbé une goutte d'éther dans un baromètre à cuvette, on verra le liquide monter et disparaître en se vaporisant dès qu'il arrivera dans le vide. La vapeur, comme un véritable gaz, déprimera le mercure de quelques millimètres, en vertu de sa force électrique. C'est à cela surtout qu'on reconnaîtra sa présence, car elle est invisible et transparente comme l'air.

998. Dans cette expérience on est frappé de la rapidité de la vaporisation; mais on conçoit le fait en observant que les premières molécules de vapeur doivent s'élancer dans le vide avec la même vitesse à peu près que l'air quand il y pénètre. Or, nous avons vu que cette vitesse était comparable à celle d'un boulet de canon (580); mais ce phénomène est encore plus remarquable quand on opère dans un espace un peu grand, par exemple, dans un ballon où on a fait le vide. On remplit d'éther l'intervalle compris entre deux robinets, et quand on ouvre celui qui donne dans le ballon on voit le liquide, entraîné par la vapeur, se projeter avec violence dans le vide, en produisant un souffle très fort, puis disparaître au même instant. Rapidité de la vaporisation.

999. Si la chambre barométrique est un peu grande, une seconde et une troisième goutte pourront encore aussi disparaître, la vapeur alors deviendra plus dense et aura une force plus grande, car le mercure sera plus déprimé. Mais il arrivera un moment où le liquide injecté ne se vaporisera plus; il s'amassera au-dessus du mercure, qui ne baissera dès lors que d'une quantité insensible, et seulement à cause du poids de la petite colonne superposée. Il est évident, d'après cela, que dans un espace donné il ne peut exister qu'une quantité déterminée de vapeur qui, dans ce cas, atteint sa plus grande force élastique; on dit alors que l'espace est *saturé*, de sorte que la *saturation de l'espace* et la *force maximum* de la vapeur sont deux Saturation de l'espace. Force maximum de la vapeur.

choses qui ont toujours lieu ensemble, et qui peuvent se reconnaître l'une par l'autre.

Force maximum de différents liquides.

1000. En répétant l'expérience sur différents liquides à la même température, on reconnaît qu'il en faut des quantités différentes pour saturer le même espace, et que la force maximum n'est pas la même. Ainsi, il se vaporise moins d'alcool que d'éther, et moins d'eau que d'alcool; l'éther produit une dépression de 15 à 20 centimètres quand celle de l'eau n'est que de quelques millimètres, et que celle de l'acide sulfurique est à peine visible.

Force maximum à différentes températures.

1001. Jusqu'à présent nous avons supposé la température invariable, mais si on opère par un temps très chaud, on trouvera que chaque liquide se vaporise en bien plus grande quantité, et atteint une force maximum beaucoup plus grande. Il suffit, pour reconnaître l'influence de la chaleur, de brûler un peu de papier autour du tube barométrique; on voit alors le mercure, qui était stationnaire, descendre rapidement en même temps que le liquide placé au-dessus diminue.

Cas où la vapeur se comporte comme un gaz.

1002. *Tant que l'espace n'est pas saturé*, la vapeur d'un liquide quelconque se comporte exactement comme un gaz dans les changements de volume dus aux changements de pression ou de température; l'analogie, en effet, est devenue complète après la liquéfaction du gaz. Mais on peut établir le fait directement en opérant dans l'appareil de *Dalton* (509) sur de la vapeur d'éther, par exemple. Soit qu'on la comprime, soit qu'on la dilate, elle suit la loi de *Mariotte*, du moins quand on ne se rapproche pas trop du point de saturation. Si l'on met dans l'appareil de l'air soumis à la même pression, on reconnaît que les changemens de volume sont les mêmes quand on fait varier la température, de sorte que le coefficient de la dilatation des gaz peut s'appliquer aux vapeurs.

Effets de la pression quand l'espace est saturé.

1003. Pour étudier l'effet de la pression sur la vapeur, quand elle sature l'espace, on fait passer un excès de liquide dans l'appareil de Dalton; alors on voit, en plongeant ou en relevant le tube, que la colonne de mercure soulevée est toujours la même, d'où l'on conclut (510) que la force de

la vapeur est toujours la même aussi. Nous supposons qu'on évite toute variation de température, et que dans toutes les positions du tube l'espace reste saturé, ce qui a nécessairement lieu tant que la vapeur reste en contact avec son liquide. L'effet de la pression, quand on enfonce le tube d'un centimètre, est donc de liquéfier un centimètre de vapeur (516); la force, du reste, n'est nullement augmentée, comme cela arrive quand on fait cette expérience sur l'air. Si on élève le tube, une nouvelle quantité de liquide se vaporise, de sorte que la densité se trouve la même, quoique l'espace soit devenu plus grand.

1004. Lorsqu'on échauffe le tube, en maintenant toujours la saturation, la vapeur prend une force incomparablement plus grande que celle qu'on calculerait par le coefficient de dilatation des gaz. Cela vient de ce que la densité augmente par la vaporisation d'une nouvelle quantité de liquide. Par contre, si on abaisse la température, la force diminue bien plus que dans les gaz, parce que ce refroidissement, au lieu d'augmenter la densité la diminue, une partie de la vapeur repassant à l'état liquide. Effets de la température.

1005. Un fait bien remarquable, c'est qu'il suffit de refroidir une portion de l'espace qui contient la vapeur pour qu'elle se réduise en un instant à la force élastique qu'elle aurait si on avait refroidi la totalité. Ainsi, pour l'équilibre, la force élastique doit être partout la même, et ne peut surpasser celle qui convient à la température minimum. Watt a fait, comme nous le verrons, une application capitale de ce principe dans les machines à vapeur. Notons encore ici, que la densité doit varier d'un point à l'autre, précisément parce que la tension est uniforme malgré la différence de température. Remarques.

1006. On doit à M. *Dumas* un procédé général pour déterminer la densité des vapeurs; prenons le mercure pour exemple. On en mettra un peu dans un ballon de verre, c'est-à-dire plus qu'il n'en faut pour le remplir de vapeur à saturation; on assujettira le ballon dans un bain de métal fondu dont on élèvera la température à 400° environ. En se vaporisant, le mercure chassera l'air et sortira lui-même Densité de vapeurs. Procédé de Dumas. Fig. 309.

en partie, de sorte qu'au bout d'un certain temps il ne restera que de la vapeur. C'est alors qu'on fermera le ballon en fondant le col qu'on aura eu la précaution d'effiler en pointe. La température à cet instant sera donnée par un thermomètre à air plongé dans le bain métallique. Du poids du ballon plein retranchant le poids du verre, on aura le poids d'un volume déterminé de vapeur, puisque le ballon peut être jaugé. La température de cette vapeur au moment où elle remplissait le ballon sera connue, puisqu'elle est celle du bain métallique. Sa force élastique était égale à celle de l'air au moment où on a fermé ; on la connaîtra donc par la hauteur du baromètre. Calculant ensuite le poids de l'air capable de remplir le ballon dans les mêmes circonstances de pression et de température, il ne restera plus, pour avoir la densité, qu'à diviser le poids de la vapeur par le poids de l'air.

Observations. 1007. La pesée du ballon plein doit être nécessairement ramenée au vide (489) ; il est également indispensable de s'assurer qu'il ne reste pas d'air avec la vapeur dans le ballon. Cela se fait en cassant la pointe plongée dans l'eau ; s'il n'y a pas d'air, l'eau s'élance, et remplit toute la capacité; s'il en reste une bulle, il faudra en tenir compte pour corriger le volume de la vapeur et sa force élastique. Il est d'ailleurs nécessaire de répéter plusieurs fois l'expérience pour bien s'assurer par la concordance des résultats que toute la substance introduite était transformée en vapeur.

Procédé de Gay-Lussac. Fig. 310. 1008. Pour les liquides qui se volatilisent aisément, comme l'eau, l'alcool, l'éther, M. Gay-Lussac a imaginé un procédé plus facile. On enferme le liquide dans une petite ampoule de verre qu'on fait passer sous une cloche graduée pleine de mercure. Cette cloche est entourée d'un manchon de verre contenant de l'eau qu'on porte à l'ébullition. Bientôt l'ampoule crève, et la vapeur déprime le mercure. On a eu soin de prendre une ampoule assez petite pour que l'espace ne soit pas saturé. Cela se reconnaît à ce que la force de la vapeur mesurée par la dépression est moindre que la force maximum donnée par les tables pour la température où l'on opère (1018). De cette manière on

est sûr qu'il ne reste rien à vaporiser, et que le poids du liquide que renfermait l'ampoule est précisément le poids de la vapeur ; son volume est d'ailleurs connu par la graduation de la cloche corrigée de la dilatation du verre. Calculant ensuite le poids d'un pareil volume d'air dans les mêmes circonstances de pression et de température, on a la densité par le rapport des poids. La vis *V* sert à prendre le niveau d'où l'on doit compter la hauteur.

1009. *Densité des vapeurs, celle de l'air étant* 1°

Iodide de mercure	16,2
Iodide d'arsenic	16,1
Acide arsénieux	13,85
Bromide de mercure	12,16
Arsenic	10,65
Bromure de mercure	10,11
Sublimé corrosif	9,8
Bichlorure d'étain	9,199
Iode	8,716
Chlorure d'antimoine	7,8
Calomel	6,35
Mercure	6,976
Soufre	6,617
Cinabre	5,95
Brome	5,54
Camphre	5,488
Essence de térébenthine	4,763
Phosphore	4,355
Acide acétique	3,067
Acide sulfurique anhydre	3
Sulfure de carbone	2,644
Éther sulfurique	2,586
Éther hydrochlorique	2,212
Acide hyponitrique	1,72
Alcool	1,6133
Acide hydrocyanique	0,9476
Eau	0,6235

Poids spécifique des vapeurs.

1010. Tant que les vapeurs se comportent comme le gaz (1002), leur densité par rapport à l'air ne change pas; de sorte qu'on calcule aisément le poids d'un volume donné pour une température et pour une pression déterminée. Si je veux, par exemple, le poids p d'un litre de vapeur d'eau à t degrés sous la pression h millimètres, je cherche le poids d'un litre d'air supposé dans les mêmes circonstances, (943) et j'en prends les 0,6235 ou les $\frac{5}{8}$ par approximation : j'ai ainsi en grammes

Poids d'un litre de vapeur d'eau.

$$\frac{5}{8} \times \frac{\dfrac{1^{gr}\,3 \times h}{760}}{1 + \dfrac{t}{267}} \quad \text{ou} \quad \frac{284\,h}{267 \times t} \text{ en milligrammes.}$$

On trouve ainsi qu'à 100° sous la pression 760^{mm} un litre de vapeur d'eau pèse 0^{gr}, 589. A chaque température la densité de la vapeur a une valeur *maximum*, de sorte que dans la formule on ne peut pas supposer plus grand que la force *maximum* de la vapeur à la température que l'on considère (1018).

Densité calculée.

1011. Si, au poids d'un litre d'hydrogène, on ajoute celui d'un demi-litre d'oxigène, les deux gaz étant à 100° sous la pression 760^{mm}, on tombe à très peu près sur le poids d'un litre de vapeur d'eau supposée dans les mêmes circonstances. Or, la chimie démontre que l'eau est en effet formée de ces deux gaz dans le rapport de 2 à 1 en volume ; on peut donc conclure que la densité de la vapeur d'eau est égale à celle de l'hydrogène, plus la moitié de celle de l'oxigène, ce qui donne le nombre 0,6201. Par des considérations analogues empruntées à la chimie, on détermine la densité de la vapeur de plusieurs autres substances, et on peut arriver ainsi à de résultats très exacts: 1° parce que les densités des gaz dont on fait usage dans le calcul sont connues avec beaucoup de précision; 2° parce que les gaz se combinent dans des rapports simples en volume, et par cela même faciles à connaître; 3° enfin, parce que la densité ainsi calculée est celle de la vapeur considérée

vraiment comme un gaz, tandis que la densité trouvée par expérience est en général trop près du point de saturation pour qu'on puisse lui appliquer avec sécurité la loi de Mariotte et le coefficient de la dilatation des gaz. Les gaz ne différant pas réellement des vapeurs, on conçoit qu'on a pu calculer de même la densité de plusieurs d'entre eux à l'aide de considérations chimiques.

Rapport entre les volumes du liquide et de la vapeur.

1012. La vapeur une fois formée se dilatant indéfiniment comme un gaz quand on l'échauffe et qu'on lui présente un espace libre, on conçoit qu'il n'y a pas de rapport déterminé entre son volume et celui du liquide qui lui a donné naissance; mais si on fixe la température et la pression, le rapport se détermine. Par exemple, il résulte des expériences de Gay-Lussac qu'à 100° sous la pression de 760^{mm}, la vapeur occupe un espace 1698 fois aussi grand que l'eau d'où elle provient, en supposant celle-ci au maximum de densité; en sorte qu'un gramme d'eau ou un centimètre cube donne, dans les circonstances indiquées, $1^l,698$ de vapeur.

En effet, pour avoir en litres le volume V d'un gramme de vapeur, il n'y a qu'à chercher combien de fois le poids d'un litre (1010) est contenu dans 1^{gr} (136) on a ainsi

$$V = \frac{1}{0,589} = 1^l,698.$$

Condensation remarquable des vapeurs.

1013. Puisque dans le même espace il se vaporise une quantité de liquide de plus en plus grande à mesure qu'on élève la température, on conçoit qu'on puisse augmenter ainsi presque indéfiniment la densité de la vapeur. En effet, M. Caguiard Latour est parvenu à vaporiser complétement l'éther dans un espace seulement double de celui qu'occupait le liquide; la température était de 200° et la force élastique de 37 atmosphères. L'eau a été vaporisée dans un espace quadruple de celui qui la contenait à l'état liquide, de sorte que la vapeur avait une densité 165 fois aussi grande que celle de l'air. La température était alors de 400° environ. Ces expériences se faisaient dans des tubes de verre très épais qui se brisaient souvent par une violente explosion.

CHAPITRE IV.

FORCE DES VAPEURS.

§ 1er. *Mesure de la force maximum des vapeurs.*

Force remarquable de la vapeur.

1014. La force élastique des vapeurs est un ressort extrêmement puissant, dont on observe à chaque instant les effets, soit dans les arts, soit dans la nature. Nous étudierons particulièrement cette force sur l'eau, et, afin de donner une idée de ce qu'elle peut être, nous dirons d'avance qu'à 266°, température où le ressort de l'air ordinaire n'est pas même doublé, celui de la vapeur est capable de soulever une colonne d'eau de plus de 500 mètres; et cette force peut se développer dans une quantité de liquide presque impondérable.

Procédé pour mesurer la force maximum.

1015. Nous avons déjà vu qu'il y a pour chaque température une force maximum de la vapeur (999); donnons d'abord une idée des procédés qui ont servi à la mesurer.

1° Au-dessous de zéro. Fig. 311.

Pour avoir la force de la vapeur à zéro et au-dessous, M. Gay-Lussac s'est servi de deux baromètres à cuvette, dont l'un, recourbé par sa partie supérieure, s'engageait dans un vase où l'on produisait un froid artificiel avec un mélange de sel et de glace. C'était dans ce baromètre qu'on introduisait l'eau. La vapeur, à mesure qu'elle se formait, allait se congeler dans la partie froide, de sorte qu'au bout de quelque temps il ne restait plus de liquide au-dessus du mercure. Mais la chambre barométrique n'en demeurait pas moins pleine de vapeur; car au moyen de l'autre baromètre on constatait une dépression qui mesurait évidemment la force de la vapeur (610) *à la température du mélange frigorifique*, puisqu'il fallait nécessairement pour l'équilibre que la vapeur eût la même force partout (1005). On a reconnu ainsi qu'à 20° au-dessus de zéro, la

vapeur avait encore une force élastique de plus d'un millimètre. Laissant ensuite le mélange s'échauffer, on a vu la dépression augmenter rapidement, ce qui prouve que la glace, même au-dessous de zéro, émet de la vapeur, dont on a pu ainsi mesurer la force de degré en degré. A zéro on avait déjà une dépression de 5 mm; elle restait la même, que l'eau fût liquide ou à l'état de glace.

1016. Pour avoir la force de la vapeur aux degrés compris entre 0 et 100, on s'est servi également de deux baromètres, dans l'un desquels on avait introduit assez d'eau pour qu'il en restât à vaporiser même à 100°; comme cela on était sûr d'avoir toujours la tension maximum. La cuvette était une petite chaudière en fonte contenant du mercure; un manchon ou large tube de verre ouvert par les deux bouts enveloppait les deux tubes; il les dépassait à la partie supérieure et plongeait assez dans le mercure pour que l'eau dont on le remplissait pût y rester. La chaudière étant placée sur un fourneau, l'eau passait par tous les degrés entre 0 et 100°; on voyait à travers le liquide la différence de niveau entre les deux baromètres, et cette différence, ramenée à la température de zéro (954), mesurait la force de la vapeur pour la température où l'on faisait l'observation. Cette température était indiquée par des thermomètres plongés dans l'eau du manchon, où l'on avait soin de répartir uniformément la chaleur en agitant le liquide. A 100°, la différence des deux baromètres était précisément d'une atmosphère ou de 760mm. 2°. Entre zéro et 100°. Fig. 312.

1017. C'est à M. Dulong que l'on doit les meilleures mesures de la force de la vapeur au-delà de 100°. Ces mesures, qui offrent tant d'importance à cause des machines à vapeur, présentaient des difficultés dont on ne se fait guère d'idée qu'en lisant le mémoire même; mais on peut aisément concevoir le procédé en imaginant une petite chaudière C parfaitement fermée, où l'on porte l'eau à telle température que l'on veut; chaque degré est indiqué par un thermomètre *t*, et la force de la vapeur est mesurée par un manomètre *m*. 3°. Au-dessus de 100°. Fig. 313.

1018. *Force de la vapeur d'eau entre -20° et 100°.*

TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.
—20	1,333	11	10,074	42	58,792	73	261,43
—19	1,429	12	10,707	43	61,958	74	273,03
—18	1,531	13	11,378	44	65,627	75	285,07
—17	1,638	14	12,087	45	68,751	76	297,57
—16	1,755	15	12,837	46	72,393	77	310,49
—15	1,879	16	13,630	47	76,205	78	323,89
—14	2,011	17	14,468	48	80,195	79	337,76
—13	2,152	18	15,353	49	84,370	80	352,08
—12	2,302	19	16,288	50	88,742	81	367,00
—11	2,461	20	17,314	51	93,301	82	382,38
—10	2,631	21	18,317	52	98,075	83	398,28
— 9	3,812	22	19,417	53	103,06	84	414,73
— 8	3,005	23	20,577	54	108,27	85	431,71
— 7	3,210	24	21,805	55	113,71	86	449,26
— 6	3,428	25	23,090	56	119,39	87	467,38
— 5	3,660	26	24,452	57	125,31	88	486,09
— 4	3,907	27	25,881	58	131,50	89	505,38
— 3	4,170	28	27,390	59	137,94	90	525,28
— 2	4,448	29	29,045	60	144,66	91	545,80
— 1	4,745	30	30,643	61	151,70	92	566,95
0	5,059	31	32,410	62	158,96	93	588,74
1	5,393	32	34,261	63	166,56	94	611,18
2	5,748	33	36,188	64	174,47	95	634,27
3	6,123	34	38,254	65	182,71	96	658,05
4	6,523	35	40,404	66	191,27	97	682,59
5	6,747	36	42,743	67	200,18	78	707,63
6	7,396	37	45,038	68	209,44	99	733,46
7	7,871	38	47,579	69	219,06	100	760,00
8	8,375	39	50,147	70	229,07		
9	8,909	40	52,998	71	239,45		
10	9,475	41	55,772	72	250,23		

1019. *Force de la vapeur d'eau entre 100° et 266°.*

ÉLASTICITÉ de la vapeur en prenant la pression de l'atmosphère pour unité.	COLONNE de mercure à 0°, qui mesure l'élasticité.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré.
1	0m.7600	100°	1k.033
1 1/2	1 .1400	112.2	1 .549
2	1 .5200	121.4	2 .066
2 1/2	1 .9000	128.8	2 .582
3	2 .2800	135.1	3 .099
3 1/2	2 .66	140.6	3 .615
4	3 .04	145.4	4 .132
4 1/2	3 .42	149.06	4 .648
5	3 .80	153.08	5 .165
5 1/2	4 .18	153.8	5 .681
6	4 .56	160.2	6 .198
6 1/2	4 .94	163.48	6 .714
7	5 .32	166.5	7 .231
7 1/2	5 .70	169.37	7 .747
8	6 .08	172.1	8 .264
9	6 .84	177.1	9 .297
10	7 .60	181.6	10 .33
11	8 .36	186.03	11 .363
12	9 .12	190.0	12 .396
13	9 .88	193.7	13 .429
14	10 .64	197.19	14 .462
15	11 .40	200.48	15 .495
16	12 .16	203.60	16 .528
17	12 .92	206.57	17 .561
18	13 .68	209.4	18 .594
19	14 .44	212.1	19 .627
20	15 .20	214.7	20 .660
21	15 .96	217.2	21 .693
22	16 .72	219.6	22 .726
23	17 .48	221.9	23 .759
24	18 .24	224.2	24 .792
25	19 .00	226.3	25 .825
30	22 .80	236.2	30 .990
35	26 .60	244.85	36 .155
40	30 .40	252.55	41 .320
45	34 .20	259.52	56 .485
50	38 .00	265.89	51 .650

Remarques sur la construction des tables.

1020. Il ne faut pas s'imaginer que pour construire ces tables on se soit astreint à mesurer la force précisément de degré en degré ou par nombre exact d'atmosphères; cela serait inexécutable. On a pris un certain nombre de mesures à des températures quelconques, mais assez rapprochées les unes des autres; ensuite par des tâtonnements que l'habitude du calcul apprend à faire, on a construit des formules qui représentaient les observations et qui devaient par conséquent donner des nombres très sensiblement exacts pour les cas intermédiaires, et même à une certaine distance au-delà des cas observés. Ces formules d'*interpolation* sont d'un emploi général en physique; ici, par exemple, les températures qui correspondent aux tensions de 1 à 4 atmosphères inclusivement, ont été calculées par une formule due à *Tredgold*, qui dans cette partie de l'échelle s'accorde mieux que tout autre avec les observations. Plus loin on s'est servi d'une autre formule qui représente si bien les nombres trouvés par expérience qu'on peut l'étendre sans craindre d'erreur notable jusqu'à 50 atmosphères. Les mesures ont été prises réellement jusqu'à 24 atmosphères, c'est-à-dire jusqu'à la température de 224°,2.

Formules d'interpolation.

Force de la vapeur des liquides autres que l'eau. Loi de Dalton.

1021. On n'a pas de tables pour les autres vapeurs, mais on calcule approximativement leur force par la loi de Dalton; d'après cette loi *si les forces de deux vapeurs sont égales, elles le seront encore quand les températures varieront d'un même nombre de degrés*. Ainsi les vapeurs d'eau et d'alcool ayant la même force l'une à 100° et l'autre à 79°, il y aura encore égalité à 110° et 89°, à 90° et 69°, etc. Prenant donc dans les tables la force de la vapeur d'eau à 90°, on aura celle de l'alcool à 69. Ainsi, pour appliquer la loi, tout se réduit à trouver deux températures où les forces soient égales, et on y parvient directement en introduisant le liquide proposé dans le tube barométrique; si à 15° on trouve une dépression de 23mm,1, on saura par la table que la force est la même que celle de l'eau à 25°, et on aura ainsi les deux points de départ. Mais les forces des vapeurs étant égales pour tous les liquides en ébullition, ainsi que nous le verrons, la table des points d'ébullition (1029) donne immédia-

tement des points de départ pour les différents liquides. Ordinairement même on énonce la loi en disant que les *tensions sont égales à distances égales des points d'ébullition*. La loi de Dalton devient inexacte quand on s'éloigne trop des points de départ.

1022. Lorsqu'on mêle plusieurs vapeurs, la force totale est la somme des forces partielles, pourvu qu'il n'y ait pas d'action chimique. Ainsi la tension de l'alcool faible est la somme des tensions de l'alcool absolu et de l'eau. Force des vapeurs mêlées.

§ II. *Phénomène de l'ébullition.*

1023. Nous examinerons maintenant les effets que produit la force des vapeurs, et en premier lieu le phénomène si remarquable de l'*ébullition*. Si nous étudions ce phénomène dans un vase de verre rempli d'eau et posé sur le feu, nous verrons d'abord l'air dissous dans le liquide reprendre l'état de gaz en formant une infinité de bulles qui naissent surtout contre les parois auxquelles la chaleur est appliquée, puis s'élèvent à travers la masse en grossissant. Peu à peu ce dégagement d'air diminue quoique la température s'élève; il semble ensuite reprendre avec plus de force; mais alors les bulles se liquéfient en traversant le liquide, d'où l'on peut conclure qu'elles sont formées par de la vapeur et non plus par de l'air. Ces petites condensations successives qui ont lieu près du fond occasionnent un bruit particulier résultant de la vibration du liquide et du vase; c'est ce qui constitue le *frémissement*. Mais bientôt le liquide est assez échauffé pour que les bulles puissent le traverser sans s'y dissoudre, elles peuvent même s'y former à différentes hauteurs. On voit d'après cela que l'*ébullition* consiste dans la formation de la vapeur au sein même du liquide. Phénomène de l'ébullition. Frémissement.

1024. On croit généralement qu'il faut une haute température pour faire bouillir de l'eau, mais réellement la seule condition nécessaire est que la force de la vapeur soit plus grande que la pression supportée par le liquide, et il est évident qu'on remplit cette condition tout aussi bien en diminuant la pression qu'en élevant la température. Ainsi, Condition de l'ébullition.

dans les circonstances ordinaires, la pression étant de $0^m,76$, il faut une température de 100°; mais il est évident que, si on opère dans le vide, la température ordinaire suffira; et il est facile de voir par la table des forces élastiques que l'eau même à zéro doit se mettre à bouillir dès que le vide est fait à 3 ou 4 millimètres L'ébullition s'arrête quand on cesse de pomper, parce que l'espace se trouve bientôt saturé de vapeur dont la pression s'oppose à la formation des bulles.

Autre manière de faire l'expérience. Fig. 314.

1025. On peut répéter l'expérience sans machine pneumatique et simplement avec un ballon à moitié plein d'eau qu'on a fait bouillir pour chasser l'air du vase. L'appareil étant bien fermé on produira l'ébullition quand l'eau ne sera plus que tiède en appliquant sur la partie supérieure une éponge imbibée d'eau froide ou mieux encore un morceau de glace, parce qu'on diminuera ainsi la force élastique de la vapeur qui est au-dessus du liquide; et même le refroidissement qu'occasionne l'air ambiant suffit pour prolonger l'ébullition longtemps après que le vase a été fermé.

Bouillant de Franklin. Fig. 315.

1026. On appelle *bouillant de Franklin* un petit appareil en verre, ordinairement composé de deux boules réunies par un tube recourbé, l'instrument est à moitié plein d'éther ou d'alcool qu'on a fait bouillir pour chasser l'air. Quand avec la main on échauffe une des boules, la vapeur dilatée pousse le liquide dans l'autre, puis passe à travers lui sous forme de bulles bientôt condensées par le refroidissement, de sorte qu'il s'établit une ébullition qui dure un certain temps. Dans le *tâte-pouls* les boules sont réunies par un tube droit; on échauffe avec la main celle qui contient le liquide; il s'y forme de temps en temps une bulle qui se condense dans la partie froide après avoir élevé momentanément le niveau dans le tube; ce niveau présente ainsi des oscillations plus ou moins fréquentes suivant la chaleur de la main. L'expérience réussit mieux quand on incline l'appareil, parce que la pression étant moindre, les bulles se forment plus aisément.

Tâte-pouls.

Ébullition dans l'air. Invariabilité de la température.

1027. Nous avons vu en construisant le thermomètre que l'eau soumise à la pression constante de l'air ne s'é-

chauffe plus dès qu'elle a commencé à bouillir; toute la chaleur qu'on ajoute alors ne sert qu'à former la vapeur qui s'échappe en bulles dès qu'elle est formée. On a là un moyen très simple et très précieux de maintenir une température invariable autant de temps qu'on veut.

Détermination des points d'ébullition.

1028. La pression de l'air étant à peu près constante, le *point d'ébullition* d'un liquide dans l'air est à peu près constant aussi, puisque c'est la température où la force de la vapeur qui surpasse un tant soit peu la pression atmosphérique. Cependant quaud on veut déterminer rigoureusement le point d'ébullition, il faut opérer sous la pression normale $0^m,76$. Voici les résultats obtenus ainsi pour les principaux liquides.

1029. *Table des points d'ébullition.*

Acide sulfureux	-10°
Éther hydrochlorique	$+11$
Acide hydrocyanique	26,5
Acide hyponitrique	28
Éther sulfurique $d = 0,715$	35,5
Sulfure de carbone	45
Brome	47
Éther hydriodique	65
Esprit de bois	66
Alcool $d = 0,793$	78,8
Acide nitrique le plus concentré	86
Eau pure	100
Essence de térébenthine $d = 0,872$	156,8
Iode	175
Camphre	204
Phosphore	290
Soufre	300
Acide sulfurique $d = 1,84$	310
Huile de lin	316
Mercure	350

Détermination approchée.

1030. Lorsqu'on n'a qu'une très petite quantité de liquide,

on peut déterminer approximativement le point d'ébullition par la loi de Dalton (1021). On en fait passer dans un baromètre assez pour qu'il y ait saturation, et si on observe, par exemple, à 20° une dépression de 376mm, on conclut, en consultant la table (1018), qu'on est à 19° au-dessous du poids d'ébullition qui se trouve par conséquent à 39°.

Circonstances qui influent sur le point d'ébullition.

1° Pression de l'air.

1031. La pression de l'air varie en général trop peu pour que dans les circonstances ordinaires on s'aperçoive de son influence sur le point d'ébullition. Mais à de grandes hauteurs, l'air pressant beaucoup moins, les effets sont si marqués qu'on n'a pas besoin d'instrument pour les reconnaître. Ainsi, même avant l'invention du thermomètre, on savait que l'eau bouillante était beaucoup moins chaude sur les hautes montagnes, car certaines substances y cuisent très difficilement. Sur le Mont-Blanc, par exemple, l'eau bout déjà à 84°; et comme dès lors elle ne s'échauffe plus (1027), il faut un temps très long pour y cuire des œufs; la coagulation de l'albumine de l'œuf deviendrait même impossible si le baromètre n'était pas au moins à 0m 27, puisque alors la température n'atteindrait pas 75°.

Ébullition sur les montagnes.

Dans les lieux profonds.

On conçoit qu'au contraire l'eau bouillante doive être plus chaude dans des lieux très profonds; on voit par la table des forces élastiques que si on faisait bouillir de l'eau sous une cloche de plongeur à la profondeur de 32 pieds, sa température serait de 122° environ.

2° Pression du liquide.

1032. Plusieurs circonstances influent encore sur le point d'ébullition, et on doit y avoir égard lorsqu'on veut déterminer ce point avec exactitude. Ainsi, dans un vase profond, la pression due au liquide peut être assez considérable pour retarder sensiblement l'ébullition. Il faut donc prendre le liquide en couche assez mince pour que sa pression puisse être négligée, ou bien plonger le thermomètre seulement dans la couche supérieure.

3° Nature du vase.

1033. La nature du vase a une influence très notable; ainsi l'eau qui bout à 100° dans un vase de métal, peut avoir près du fond une température de 101°, dans des vases de terre ou de verre. En outre, dans les vases de verre dont le fond est uni et régulier, comme il n'y a pas de raison

pour que l'ébullition commence par un point plutôt que par l'autre, il se forme à de longs intervalles une large bulle sur tout le fond à la fois, d'où résulte un soulèvement général du liquide qui retombe ensuite brusquement. Ces *soubresauts* sont très marqués pendant la distillation de l'acide sulfurique dans des cornues de verre dont ils occasionnent souvent la fracture. On les prévient en mettant quelques corps irréguliers dans le liquide, comme des fragments de verre ou quelques morceaux de platine; les bulles alors prennent naissance sur les aspérités et s'élèvent d'une manière continue. Le zinc et le fer, dans les liquides où on peut les employer, réussissent encore mieux que le platine.

1034. Les substances qui ont une action chimique sur le liquide changent notablement son point d'ébullition. Ainsi l'alcool du commerce, à cause de l'eau qu'il contient, exige une température d'au moins 80°; il faut bien 40° pour l'éther ordinaire. Mais l'action des sels est surtout remarquable comme on le voit par le tableau suivant dû à M. Legrand. 4° Pureté du liquide.

Point d'ébullition de l'eau saturée de

Sulfate de soude	100°,7
Acétate de plomb	102
Chlorate de potasse	104 ,2
Chlorure de barium	104°,4
Carbonate de soude	104 ,6
Chlorure de potassium	108 ,3
Chlorure de sodium	108 ,4
Hydrochlorate d'ammoniaque	114 ,2
Tartrate neutre de potasse	114 ,67
Nitrate de potasse	115 ,9
Chlorure de strontium	117 ,9
Nitrate de soude	121
Carbonate de potasse	135
Nitrate de chaux	151
Chlorure de calcium	179 ,5
Nitrate d'ammoniaque	180

Applications. 1035. On utilise cette action des sels pour obtenir dans certains cas une température constante et supérieure à 100°. Par exemple, on introduit du sel marin dans l'alambic pour la distillation de l'eau de fleur d'orange, l'opération marche bien plus vite à la température d'environ 108° qu'on obtient alors.

Les sels diminuent la densité et la force de la vapeur. 1036. L'ébullition des dissolutions citées dans le tableau se faisant à l'air libre, la force de la vapeur ne surpassait pas une atmosphère, quoique la température fût bien supérieure. Par exemple, avec le carbonate de potasse, au lieu de 3 atmosphères qu'on aurait pu avoir à 135°, on n'en avait qu'une. Cependant la vapeur d'eau était pure puisque ce sel n'est pas volatil, et c'était de la vapeur à saturation puisqu'elle était en contact avec son liquide. Une force si petite à une aussi haute température montre évidemment une densité très faible, et on conclut qu'un sel en liquéfiant une portion de la vapeur par son affinité, fournit un moyen d'en diminuer la force sans changer le volume ni la température.

Point d'ébullition trouvé par le baromètre. 1037. Avec une table des forces de la vapeur et un baromètre, on peut trouver le point d'ébullition sans thermomètre, ce qui permet de marquer exactement le point 100° quand on construit cet instrument (842), sans attendre que la pression soit réellement de 0m, 76. Si par exemple le

Détermination exacte du point 100° des thermomètres. baromètre marque 0m, 733, la température n'est que de 99° (1018). Ayant ce point et celui de la glace fondante, on divisera l'intervalle en 99 parties, et une de ces parties, portée au-dessus de 99°, donnera le point 100°. Si le baromètre marquait 750mm, on observerait qu'une différence de 27mm répond à 1°, et que par conséquent les 10mm de différence répondent sensiblement à 0°,37; c'est-à-dire que la vraie température est 99°,63. L'intervalle au zéro serait divisé en 9963 parties; 37 de ces parties, prises en sus, donneraient le produit 100°. A Paris, les hauteurs extrêmes du baromètre étant 719mm et 781mm, on voit que les températures extrêmes de l'ébullition sont 98°,5 et 100°,8.

Hauteur barométrique trouvée par le point d'ébullition. 1038. Réciproquement, en prenant le point d'ébullition avec un thermomètre très sensible, on trouve la hauteur

du baromètre par la table des tensions, et cela fournit le moyen de mesurer la hauteur des montagnes avec le thermomètre; puisque deux observations thermométriques faites ainsi, l'une au pied, l'autre au sommet, peuvent être ainsi converties en observations barométriques; mais ce procédé ne vaut pas le procédé direct.

Mesure des montagnes par le thermomètre.

1039. Un physicien français nommé *Papin* eut le premier l'idée de chauffer l'eau sans lui permettre de bouillir. Son appareil consistait en un vase de cuivre très épais, dont le couvercle était maintenu par la pression d'une forte vis, et présentait une soupape de sûreté. La température de l'eau, dans ce vase fermé, n'est plus bornée à 100°, elle s'élève indéfiniment; l'étain, le plomb peuvent s'y fondre. Si on y met des os, le liquide en peu d'instants se trouve chargé de gélatine: les os sont alors blancs et friables comme s'ils avaient été calcinés. Si on ouvre la soupape quand la température est très élevée, la vapeur s'échappe avec une violence et un bruit extraordinaires, et le liquide retombe à 100°; mais quelquefois il se vaporise entièrement et le vase reste sec.

Digesteur de Papin. Fig. 316.

1040. On a voulu, dans ces derniers temps, employer la marmite de Papin à la préparation des aliments; et il est certain que la cuisson des viandes s'y fait incomparablement plus vite, et tout aussi bien que dans une marmite ordinaire; mais il y a eu des explosions qui ont fait renoncer à cet emploi. L'appareil portait le nom de marmite *autoclave*, parce qu'il se fermait de lui-même, et d'autant mieux que la vapeur faisait plus d'efforts pour sortir. Dans l'ouverture *a b* qui était elliptique, on introduisait un couvercle A B, de même forme, mais plus large, en présentant le plus petit diamètre au plus grand. Une fois introduit, ce couvercle était retourné, et la vapeur, en le pressant contre l'ouverture, se fermait elle-même le passage.

Marmite autoclave. Fig. 317.

§ III. *Machines à vapeur.*

1041. On trouve dans les anciens cabinets de physique un appareil appelé *éolipyle*, (porte d'Eole), dans lequel on

Éolipyle. Fig. 318.



donne à la vapeur une force assez considérable pour produire quelques effets curieux. C'est une espèce de poire creuse en métal, qu'on peut manier par un manche M, et dont la queue T offre un canal très étroit. On y fait entrer de l'eau comme dans les thermomètres, et on la chauffe ensuite fortement quand elle est à moitié pleine. La vapeur sort alors avec violence, de sorte qu'avec son souffle, on peut mettre en mouvement différents appareils, comme on le ferait avec le vent. La vapeur se refroidit tellement en se dilatant dans l'air, qu'elle paraît à peine tiède. En inclinant convenablement l'éolipyle, on a un jet d'eau qui peut s'élancer à 25 pieds. Si, au lieu d'eau, on a mis de l'esprit-de-vin ou de l'eau-de-vie, on peut enflammer le jet; mais il est à remarquer que la flamme ne commence qu'à une certaine distance de l'ouverture, à cause de la trop grande vitesse du liquide dans l'air.

Tourniquet à vapeur.

1042. La vapeur, en s'échappant d'un vase mobile, produit un recul, comme nous l'avons vu pour les liquides et pour l'air (586). Ainsi, le tourniquet à gaz (fig. 232) étant vissé sur la marmite de Papin, tourne rapidement; on produit encore un recul en mettant sur un petit chariot, pendant que la vapeur s'échappe, une espèce d'éolipyle ayant une ouverture fermée par un bouchon. Au-dessous se trouve une lampe, qui, en échauffant l'eau, fait sauter le bouchon par la force de la vapeur, et on voit alors le chariot rouler en reculant.

Chariot à vapeur.

Projectiles lancés par la vapeur.

1043. Un ingénieur anglais, M. Perkins, a construit, il y a quelques années, un appareil pour lancer des projectiles par la force de la vapeur. Une petite chaudière cylindrique en bronze, de 3 pouces d'épaisseur, contenant 36 litres d'eau environ, était chauffée de manière à donner à la vapeur une force de 35 à 40 atmosphères; ce qui équivaut à une pression de 700 livres à peu près par pouce carré. On établissait à volonté une communication avec un canon de fusil, où les balles arrivaient latéralement par une espèce de trémie, de sorte qu'elles étaient lancées d'une manière presque continue (quatre à cinq cents par minute), et avec autant de force que par un fusil ordinaire. En portant la pression à 840 livres par pouce carré, les

balles, en frappant contre une plaque de fonte à 100 pieds de distance, ne s'aplatissaient plus comme auparavant, mais se réduisaient en parcelles qu'on avait peine à retrouver. Quelquefois, dans les canons ordinaires, on voit des effets de la force de la vapeur. Ainsi, quand ils sont très échauffés après plusieurs coups tirés de suite, l'*écouvillon* mouillé qu'on y introduit pour les rafraîchir est violemment repoussé, s'il remplit trop exactement le calibre. *Vauban*, en comparant la force de la vapeur à celle de la poudre, a vu que 140 livres d'eau réduite en vapeur pouvaient soulever une masse de 77 milliers, tandis qu'il fallait près de 260 livres de poudre pour produire le même effet. Il est infiniment probable que la force de la vapeur joue un très grand rôle dans les explosions volcaniques et dans les tremblements de terre ; c'est elle évidemment qui, près de l'*Hécla*, en Irlande, lance ces jets immenses d'eau bouillante, connus sous le nom de *Geysers*.

1044. Pour nous faire idée des machines à vapeur proprement dites, considérons un corps de pompe AB, dans lequel peut jouer le piston P. La vapeur, provenant d'une chaudière fermée, entre par le tuyau T dans la *boîte à tiroir* M, et de là par *t* pénètre dans la partie supérieure du corps de pompe. Si la force de cette vapeur est de plus d'une atmosphère, l'air qui est au-dessous du piston sera refoulé dans la boîte par le tuyau *t'*, et de là chassé au dehors par l'ouverture T'. Si l'instant d'après on lève la tige du *tiroir*, la vapeur changera de route : arrivant toujours par T, elle passera par *t'* dans la partie inférieure du corps de pompe, et pourra faire remonter le piston, parce que la vapeur qui est au-dessus n'a plus que la force d'une atmosphère, à cause de la communication qui s'établit alors avec l'air extérieur par le tuyau *t'*, le tiroir N et l'ouverture T'. Ainsi, en intervertissant convenablement les communications par le moyen du tiroir ou de tout autre système de robinets ou de soupapes, on fera alternativement monter et descendre le piston avec une force aussi grande qu'on voudra, puisqu'on est maître d'augmenter sa surface et la tension de la vapeur. La tige L, qui est rigide, se

Machines à vapeur proprement dites.

Fig. 320.

trouve de la sorte animée d'un mouvement de *va et vient*, qu'on transforme ordinairement en mouvement de rotation, comme nous le verrons tout à l'heure.

Condenseur de Watt. 1045. Dans certaines machines, le tuyau T', au lieu de s'ouvrir dans l'air, aboutit à un vase vide d'air où jaillit continuellement de l'eau froide. La vapeur, en arrivant dans cet espace, se liquéfie et perd à peu près complétement sa force élastique dans toute son étendue (1005), de sorte qu'il n'y a plus sur le piston qu'une contre-pression très faible.

Machines à basse et à haute pression. 1046. On appelle machines à *basse pression* celles où la force de la vapeur ne dépasse guère une atmosphère ; il leur faut nécessairement un *condenseur*. Dans les machines à *haute pression*, la force de la vapeur va jusqu'à 6 ou 7 atmosphères; le plus ordinairement elles sont sans *condensation*, de sorte qu'on les reconnaît aux bouffées de vapeur qu'elles lancent à chaque coup de piston dans l'atmosphère. Les machines à basse pression se reconnaissent à l'énorme quantité d'eau chaude qu'elles versent au dehors. Cette eau provient du condenseur où on la renouvelle continuellement, à mesure qu'elle s'échauffe par la vapeur qui s'y liquéfie.

Machines à détente. 1047. Autrefois on laissait arriver la vapeur jusqu'à ce que le piston fût au bout de sa course; maintenant on en interrompt l'arrivée quand il en a parcouru seulement une partie ; son mouvement s'achève par la vitesse acquise et par la *détente* de la vapeur. En effet, la vapeur introduite est comme un ressort qui se détend à mesure que l'espace augmente, mais qui néanmoins pousse encore le piston avec une certaine force. On admet que la vapeur, en se détendant, suit la loi de Mariotte (1002), de sorte qu'en la supposant d'abord à 5 atmosphères quand le volume était 0,6, on voit par la proportion (514),

$$5 : x :: 1 : 0,6,$$

que la force est encore de 3 atmosphères à la fin de la course. La détente se règle avec un robinet gradué, de

sorte qu'on a plus ou moins de force suivant les différents cas.

1048. Le piston, dans les machines à basse pression, se compose de deux plaques circulaires de fonte, entre lesquelles on comprime fortement de la filasse imprégnée de suif. Dans les machines à haute pression, où la température va jusqu'à 170°, le piston est entièrement métallique : d'un côté il présente 3 segments A B C, poussés par des ressorts qui s'appuient contre les coins *a b c*, de sorte qu'ils s'appliquent toujours exactement contre les parois du cylindre ; de l'autre côté il y a un appareil tout semblable, mais les jonctions des segments inférieurs répondent aux pleins des supérieurs, afin que la vapeur ne puisse pas passer, même quand par l'usure les jonctions deviennent imparfaites. Pistons. Fig. 321.

1049. La chaudière qui fournit la vapeur est ordinairement un cylindre en fonte de 2 ou 3 pieds de diamètre sur 15 à 20 pieds de long, terminé par deux hémisphères ; inférieurement elle communique avec deux cylindres plus étroits appelés *bouilleurs*, qui plongent immédiatement dans la flamme du fourneau. En O se trouve une large ouverture ovale qu'on appelle le *trou d'homme*, et par laquelle on descend dans la chaudière pour la nettoyer. Elle se ferme comme la marmite autoclave (1040); T est le tuyau qui donne issue à la vapeur. En S sont les soupapes de sûreté (512) et les rondelles fusibles faites pour se fondre, l'une à 10 et l'autre à 20 degrés, au-dessus de la température à laquelle fonctionne la machine. Chaudière. Fig. 322.

1050. F est le *flotteur* qui règle l'*alimentation*, c'est-à-dire l'introduction de l'eau. C'est ordinairement une pierre équilibrée par un contre-poids P, de manière à plonger en partie; le fil qui la soutient traverse une *boîte à étoupes*, qui ne permet pas la sortie de la vapeur. Ce fil porte un bouchon métallique *b*, qui ferme le tuyau *t* quand le flotteur et par conséquent le niveau se trouvent à la hauteur convenable. Si l'eau vient à manquer, le flotteur baisse, et la partie supérieure du bouchon qui est échancrée laisse un Alimentation continue.

passage libre dans le tuyau d'alimentation. Si la machine est à haute pression, il faut nécessairement que l'eau soit foulée dans ce tuyau par une pompe. La pompe, mise en mouvement par la machine même, marche continuellement; mais quand le passage n'est pas libre en *b*, l'eau retourne dans le réservoir en soulevant une soupape qui présente assez de résistance pour ne pas céder à la vapeur, quand la communication avec la chaudière est ouverte. Mais le plus ordinairement l'alimentation est réglée par un ouvrier qui, de temps en temps, d'après les indications du flotteur, tourne un robinet pour laisser arriver l'eau foulée par la pompe alimentaire.

Alimentation intermittente.

Accessoires. 1051. La chaudière présente encore quelques parties accessoires, comme un manomètre, un tuyau pour porter au dehors l'excès de vapeur. Quelquefois il y a un petit bouilleur où l'eau d'alimentation s'échauffe, afin d'arriver dans la chaudière à la même température que celle qui s'y trouve déjà. G est une soupape à air qui s'ouvrirait par la pression extérieure, s'il se faisait un vide dans la chaudière dont on prévient ainsi la déformation.

Dépôt dans les chaudières. 1052. On a indiqué, comme cause d'explosion, le dépôt qui se forme dans les chaudières. Ce dépôt, dû principalement au carbonate et au sulfate de chaux que les eaux contiennent, constitue souvent une croûte très épaisse qui gêne le passage de la chaleur, de sorte que la fonte doit être portée presque au rouge pour que l'eau en contact avec la couche calcaire s'échauffe suffisamment. Si par hasard le dépôt vient à se briser, le liquide tombe sur la paroi incandescente, d'où résulte le développement subit d'une grande quantité de vapeur. On prévient la formation du dépôt en rendant l'eau visqueuse, et le moyen le plus économique pour cela est d'ajouter une certaine quantité de pommes de terre.

Moyen de le prévenir.

Cause remarquable d'explosion. 1053. Un fait bien remarquable, c'est que l'ouverture d'une soupape peut devenir une cause occasionnelle d'explosion. Lorsque par une alimentation imparfaite l'eau se trouve en trop petite quantité, les parties latérales et supérieures de la chaudière peuvent prendre une tem-

pérature beaucoup plus élevée que celle du liquide. La pression de la vapeur n'est pas plus forte pour cela : elle ne peut être que justement égale à la tension du liquide (1005), de sorte que dès qu'on ouvre la soupape, une ébullition tumultueuse lance de l'eau, comparativement froide, au milieu de la vapeur formée, qui par cela même perd brusquement une partie considérable de sa force élastique, comme l'a fait voir M. Dulong. Alors, l'eau qui est au fond de la chaudière, moins pressée en dessus qu'elle ne l'est en dessous, se trouve projetée en masse contre les parois incandescentes qui peuvent céder à ce choc et à la tension de l'énorme quantité de vapeur formée instantanément au contact. Les parois d'ailleurs sont dans les conditions les plus favorables pour une rupture, à cause des variations brusques et opposées qui viennent d'avoir lieu dans la pression intérieure.

Essai des chaudières.

1054. D'après une ordonnance royale, les chaudières sont essayées sous une pression 5 fois aussi forte que celle qu'elles doivent supporter. Pour cet essai, qui se fait à froid, on y comprime de l'eau avec une pompe foulante, après avoir chargé convenablement les soupapes.

Jeu d'une machine à vapeur. Fig. 323. Balancier.

1055. Maintenant que nous savons comment la vapeur est produite et alternativement introduite au-dessous et au-dessus du piston, nous pouvons examiner le jeu des pièces qui transmettent et régularisent le mouvement. La tige du piston est articulée à l'extrémité H du *balancier* CC' qui est un énorme levier du premier genre à bras égaux, de sorte qu'il ne sert qu'à transmettre le mouvement. L'extrémité H décrit un arc de cercle dont le centre est au point d'appui ; mais on conserve la verticalité de la tige du piston au moyen du *parallélogramme articulé* H H *h h'*. Si le balancier tend à incliner la tige à gauche, la barre A H, mobile autour du point A qui est fixe, tend à l'incliner à droite en faisant reculer la charnière H', de sorte qu'il y a compensation. L'autre bras du balancier, articulé avec la bielle F F', fait tourner une manivelle N, et le mouvement de va et vient du piston se trouve ainsi changé en un mouvement de rotation. Quand la manivelle est en ligne droite avec

Parallélogramme articulé. Manivelle.

la bielle, le mouvement du balancier ne tend plus à la faire tourner ; mais ces positions se trouvent dépassées en vertu de la vitesse acquise, surtout à cause du volant D D, qui fait corps avec l'arbre de couche. A la rigueur le mouvement ne peut pas être uniforme, puisque le balancier passe périodiquement par divers degrés de vitesse ; mais avec un volant très lourd on rend tout-à-fait insensibles les variations qui ont lieu pendant chaque révolution.

Volant.

Régulateur à force centrifuge.

1056. Une corde sans fin C C C, mise en mouvement par l'arbre, passe sur les poulies de renvoi p, et fait tourner l'axe P du *régulateur à force centrifuge*. Si la rotation est trop rapide, les boules s'écartent, la couronne b s'abaisse, l'extrémité Q se relève et ferme en partie le robinet R qui règle l'introduction de la vapeur ; alors le mouvement du piston se ralentit, et par suite celui de l'arbre.

Jeu du tiroir.

1057. L'engrenage s, qui porte un excentrique, fait monter et descendre la tige T du tiroir ; la barre t, qui transmet le mouvement, le reçoit de l'arbre par un engrenage semblable à celui qu'on voit en s. C'est par le tuyau E que la vapeur arrive au tiroir ; elle sort par le tube K qui aboutit au condenseur O, où la petite vanne W introduit à chaque instant un jet d'eau froide.

Pompe alimentaire.

1058. Le balancier fait marcher à la fois trois pompes : 1° la pompe alimentaire dont la bielle est articulée en C, et dont on voit le corps en M. Son piston est un long cylindre plein, qui aspire l'eau chaude V provenant du condenseur, et la foule dans la chaudière par le tuyau q, lorsque le robinet r est ouvert ; 2° la pompe à air dont la bielle s'étend de C′ en p' ; elle aspire tout ce qui se trouve dans le condenseur ; le piston monte l'eau chaude dans le vase V qui fournit à l'alimentation ; l'excédant s'écoule au dehors ; 3° la pompe à eau froide qu'on ne voit pas ici, et dont la bielle est cachée derrière C′ ; elle amène l'eau d'un puits dans la bâche B B, qui s'ouvre dans le condenseur.

Pompe à air.

Pompe à eau froide.

Systèmes divers.

1059. Le système que nous venons de décrire ne doit être considéré que comme un exemple, car il y en a une infinité d'autres. Ainsi, dans le système de Wolf, il y a deux cylindres dont l'un a une section triple ou quadruple de l'autre ; les

deux pistons montent et descendent ensemble, le petit par l'effort direct de la vapeur, le grand par la détente de la vapeur qui, à la course précédente, agissait sur le petit piston. Pour cela il y a des communications croisées et un tiroir à chaque cylindre. Il est évident que si les diamètres étaient égaux, on ne gagnerait rien, puisque la vapeur résisterait autant d'un côté qu'elle pousserait de l'autre. Les deux cylindres sont entourés par une enveloppe commune en fonte qu'on appelle une *chemise*; la vapeur circule dans l'intervalle pour empêcher le refroidissement. Dans les machines dites à *cylindre oscillant*, qui sont aujourd'hui très estimées, le corps de pompe est porté sur des coussinets par deux tourillons latéraux comme une pièce d'artillerie; il s'incline alternativement dans un sens et dans l'autre, de sorte que la tige du piston agit directement sur la manivelle sans l'intermédiaire d'un balancier. La vapeur entre et sort par les tourillons qui sont creux. Il y a aussi des machines à cylindre fixe horizontal ou diversement incliné.

Système de Wolf. Fig. 324.

Cylindre oscillant.

1060. En Angleterre, on emploie avec avantage, comme moyen d'épuisement dans les mines de charbon, une machine à vapeur dont le piston descend par la pression de l'air. Supposons-le au bas du corps de pompe : si on laisse arriver au-dessous de la vapeur à 100° à peu près, il va se trouver également pressé sur les deux faces, et montera pourvu qu'à l'autre bout du balancier, il y ait un contre-poids capable de vaincre les frottements. Quand il est arrivé en haut, une communication s'ouvre entre le corps de pompe et le condenseur. C'est alors comme si on faisait le vide, puisque la vapeur perd sa force; le piston descend donc comme s'il était chargé d'une colonne d'eau ayant sa surface pour base et 10 mètres de hauteur. Cette machine, construite d'abord par Newcomen, porte encore son nom; mais elle a été considérablement perfectionnée par Watt. On l'appelle aussi machine à simple effet, parce qu'il n'y a qu'une des courses du piston qui donne un *effet utile*.

Machine atmosphérique.

1061. Dans quelques établissements de bains, par exemple, aux bains du Pont-Marie, à Paris, on se sert, pour

Machine de Savery. Fig. 325.

élever l'eau, d'une machine à vapeur dite de Savery, qui n'a pas de piston, et dont on peut se faire une idée en imaginant un vase fermé B B, communiquant avec l'eau qu'il s'agit d'élever par un tuyau d'aspiration C C garni d'une soupape *m*. Un tube D O descend au fond du vase; il a une soupape *n* à la partie inférieure. En tournant le robinet *a*, on laisse arriver de la vapeur provenant d'une chaudière : l'air se trouve bientôt chassé par la soupape *n*; alors si on interrompt l'arrivée de la vapeur, celle qui est entrée se liquéfie, et l'eau s'élance dans le vide par le tuyau C C. Quand le vase est plein, on laisse arriver de la vapeur qui, pressant sur l'eau, la fait monter par le tube D D. Cet appareil consomme beaucoup de vapeur à cause de la liquéfaction que l'eau froide occasionne; mais, par cela même, l'eau qu'on élève se trouve déjà échauffée, ce qui rétablit ici l'avantage.

Applications de la machine à vapeur.

1062. La machine atmosphérique et celle de *Savery* ne sont employées que dans des cas assez restreints, mais les applications qu'on fait de la machine à vapeur proprement dite sont vraiment innombrables; nous indiquerons seulement les bateaux à vapeur, les machines locomotives, l'élévation des eaux, l'exploitation des mines, les forges, les filatures, les soieries mécaniques, la fabrication des monnaies, etc. Après les chutes d'eau, c'est certainement la force la plus économique.

Comparaison des machines à haute et à basse pression.

1063. Du reste, pour chaque application on préfère tel ou tel système. Ainsi, pour les bateaux à vapeur, on emploie surtout les machines à basse pression; une des raisons sans doute, c'est qu'on a l'eau de condensation sous la main. Au contraire, sur les voitures on ne peut pas porter avec soi la masse énorme d'eau froide nécessaire à la condensation: il faut des machines sans condenseur et par conséquent à haute pression. Aujourd'hui, du moins en France, ces machines sont généralement préférées dans la plupart des industries, comme plus économiques. La théorie, ainsi que nous le verrons dans la section de la chaleur, indiquait bien qu'il devait en être ainsi; mais il fallait dans l'exécution des pièces une perfection qu'on n'a atteinte que

dans ces derniers temps; encore ne fait-on pas les cylindres très larges, de sorte qu'en général, la force ne dépasse guère 20 ou 30 chevaux. On réussit mieux dans les machines à basse pression, quand il faut une force plus considérable. Il y en a dans les mines de Cornouailles qui ont la force de plusieurs centaines de chevaux. D'ailleurs, en Angleterre la basse pression prévaut encore, à cause d'un grand nombre d'excellentes machines exécutées par *Watt*, qui travaillait surtout dans ce système; là d'ailleurs le bas prix de la houille rend moins sensible les avantages de la haute pression. Comme nous l'avons vu, les explosions ne sont pas plus à craindre dans un système que dans l'autre.

1064. Suivant sa destination une machine à vapeur reçoit une infinité de modifications dans ses différentes parties. Ainsi, sur un bâtiment où on ne peut pas avoir un volant qui augmenterait énormément le tirant d'eau, on établit deux machines, et on les fait marcher de manière que le temps faible de l'une réponde au temps fort de l'autre. Dès lors, l'arbre de couche tourne uniformément ainsi que les roues qui font corps avec lui; les balanciers, au lieu d'être au-dessus des cylindres, sont placés latéralement à cause du peu de hauteur de l'emplacement. Sur les bateaux, les chaudières de très grande dimension sont à foyer intérieur, c'est-à-dire qu'elles forment elles-mêmes leur propre fourneau, ce qui retranche la charge qu'occasionnerait la maçonnerie. Il est vrai qu'avec cette disposition, la combustion se fait moins bien, parce que les parois du foyer, maintenues à 100 et quelques degrés seulement par l'eau qu'elles contiennent, refroidissent le combustible. On emploie de même, sur les voitures à vapeur, tout ce qui peut alléger la charge. Il n'y a pas moyen non plus de se servir du volant. Au contraire, dans les filatures, on emploie des volants pesant jusqu'à 30 ou 40 milliers; le frottement sur l'axe consomme, il est vrai, une force de plusieurs chevaux, mais la rotation se fait avec une régularité parfaite, et c'est une condition indispensable, car sans cela les fils casseraient à chaque instant. Dans les forges, le volant est aussi très-lourd, mais dans un autre but; la force à dé-

Modifications suivant la destination.

Usages du volant.

ployer est tantôt plus grande, tantôt plus petite. Il faut, par exemple, une très grande force quand le fer passe entre les laminoirs; l'instant d'après, ceux-ci tournent à vide. Or le volant, à cause de l'inertie, est comme un magasin où la force s'amasse quand il n'y a plus de résistance, et où on la retrouve quand on en a besoin. Cette masse énorme, animée d'une grande vitesse, donne ainsi par moments une force bien supérieure à celle que la machine peut déployer d'une manière continue.

Invention des machines à vapeur.

1065. On trouve chez les anciens quelques idées sur l'emploi de la vapeur comme force motrice. Ainsi Héron d'Alexandrie, qui vivait 120 ans avant J. C., imagina une roue dans le genre du tourniquet à vapeur (1042). En 1543 *Blasco* construisit à Barcelonne un bateau qui devait aussi marcher par la réaction de la vapeur. En 1615 *Salomon de Caus*, ingénieur français, décrivit, dans sa *Raison des forces mouvantes*, une fontaine de compression mise en jeu par la vapeur, dont *Savery* fit le premier des applications en grand en 1698 (1061). Dans un ouvrage imprimé à Rome, en 1629, Giovanni Branca décrivit une espèce d'éolipyle, dont la vapeur allait frapper les ailes d'une roue. Mais le véritable inventeur des machines à piston, appelées d'abord *pompes à feu*, est *Papin*, physicien français, qui décrivit son invention en 1690 et 1695. C'était réellement la machine atmosphérique qui fut appliquée pour la première fois par *Newcomen*, en 1705. Enfin c'est à *Watt*, ingénieur anglais, qu'on doit les perfectionnements les plus importants et les machines telles qu'on les voit généralement aujourd'hui. Watt n'est mort qu'en 1819; en 1808, il avait été nommé l'un des huit associés étrangers de l'Institut. Avant lui, la condensation se faisait par une injection d'eau froide dans le cylindre même, de sorte qu'au coup de piston suivant, les premières portions de vapeur étaient liquéfiées par les parois refroidies. Il imagina alors le condenseur, et il résulta de son emploi une économie telle, qu'il l'établissait à ses frais dans les machines anciennes, demandant seulement le tiers de charbon économisé; ce qui était un produit fort considérable, car, par exemple, à Chacewater, en Cor-

nouailles, sur trois machines il touchait 60 mille francs par an, de sorte que l'économie due au condenseur était de 180 mille francs au moins. Une seconde invention de Watt, est d'avoir changé la machine atmosphérique en machine à double effet, qui est à peu près la seule employée aujourd'hui. Dans la machine atmosphérique, le piston, qui était remonté par un contre-poids, n'était lié au balancier que par une chaîne; mais, dans la machine à double effet, comme il devait agir aussi en montant, il fallait une liaison rigide et qui oonservât cependant la verticalité de la tige. Pour cela Watt imagina le parallélogramme articulé; c'était en 1784. On lui doit encore la détente, le régulateur à force centrifuge, la chemise autour du cylindre. Papin avait déjà l'idée des machines à haute pression ainsi que Watt; mais Trevithick et Vivian furent les premiers patentés pour ce système, en 1802. Le système de Wolf, à deux cylindres, est de 1804. Le premier bateau à vapeur réellement employé fut construit par Fulton, en 1807, à New-Yorck.

§ IV. *Force des machines à vapeur.*

Calcul de la force d'une machine à vapeur.

1066. On trouve approximativement la force d'une machine à vapeur bien exécutée par un calcul assez simple. Si, par exemple, la tension est de 5 atmosphères, la pression sur chaque carré de la surface du piston sera de 5^k (493). Supposons la course d'un mètre, dont les 0,6 soient parcourus avec tout l'effort de la vapeur, et le reste pendant la détente : pour premier effet nous aurons 5^k élevés à $0^m,6$ ou $5^k \times 0,6$ élevés à 1^m. Quant à l'effet dû à la détente, on l'aurait à très peu près en calculant la tension à la fin de la course (1047), et en prenant une moyenne. Mais un calcul plus rigoureux montre qu'on a immédiatement ce second effet en multipliant le premier par Log. $\frac{1}{0,6}$ qui est ici 0,512 *. L'effet total est donc

$$5^k \times 0,6 \left(1 + \text{Log.}\ \frac{1}{0,6}\right).$$

* Il s'agit ici de logarithmes népériens. M. de Prony en a donné des tables, mais on les obtient aisément en multipliant les logarithmes ordinaires par 2,303.

On estime le déchet dû au frottement, aux fuites et au mouvement absorbé par les pompes auxiliaires, etc., à $0^k,4$ par atmosphère et par centimètre carré. On devra donc retrancher $0^k,4 \times 5$ de l'expression précédente; de plus, si la température du condenseur est de 34°, par exemple, la contre-pression équivaudra à $\frac{1}{20}$ d'atmosphère, ou à $0^k,05$ par centimètre carré; de sorte que l'effet définitif sera l'élévation à 1^m d'un nombre de kilogr. égal à

$$5 \times 0,6\ (1 + \text{Log.}\ \frac{1}{0,6}) - 0,4 \times 5 - 0,05 = 2^k,486.$$

Formule générale. 1037. Si le piston s'élève à 2^m, on aura évidemment un effet double ou $4^k,972$ élevés à 1^m; et, en général, il faudra multiplier l'effet dû à une course d'un mètre par la longueur réelle z de la course *mesurée en mètres*. Il est évident aussi que l'effet dû à la pression sur un centimètre devra être pris autant de fois qu'il y aura de centimètres dans la surface du piston, c'est-à-dire qu'on devra introduire le facteur $0,7854\,d^2$, d étant le diamètre en centimètres, ou $7854\,d^2$ en mesurant d en mètres; enfin si le piston mettait une minute à monter on aurait, tout calcul fait, le poids élevé à 1^m en $1'$, mais s'il y a n courses par minute, comme la course descendante produit le même effet, ainsi que nous le verrons, il faudra prendre n fois le résultat calculé; il n'y aurait plus qu'à diviser par 60 si on voulait l'effet par seconde. D'après cela, si nous représentons par a la tension de la vapeur, par a' la contre-pression, par b la fraction de course parcourue sans détente, nous aurons, d étant mesuré en mètres:

$$131\ d^2\ nz\left[ab\ (1 + \text{Log.}\ \frac{1}{b}) - 0,4a - a'\right] \qquad (1)$$

pour le nombre de kilogrammes élevés à 1^m en $1''$.

Prenons, par exemple, $d = 0^m,35$ $n = 30$ $z = 1^m,6$ et les autres quantités comme précédemment, nous trouverons pour la force de la machine 1900^k ou un peu plus

de 25 chevaux, en admettant, comme on le fait ordinairement, 75^k pour la force d'un cheval de vapeur. Dans la manière de compter de Watt, il faudrait diviser par 101 pour avoir la force en chevaux, de sorte que ce mode d'évaluation laisse souvent de l'incertitnde d'autant plus que la force réelle d'un cheval n'est guère, terme moyen, que de 40^k élevés à 1^m par seconde. Force en chevaux.

1068. Pour que la détente produise le meilleur effet possible c'est-à-dire le plus grand travail avec la plus petite quantité possible de vapeur, il faut qu'on ait Longueur théorique de la détente.

$$b = 0{,}4 + \frac{a'}{a}. \qquad (2)$$

Nous admettrons cela comme un résultat de calcul. Ici $\frac{a'}{a} = 0{,}01$ d'où $b = 0{,}41$; la fraction de course parcourue pendant la détente doit donc être les 0,59 de la course totale dans l'exemple que nous avons choisi; c'est là la plus grande longueur qu'on puisse donner à la détente. Mais en général il y a de l'avantage à laisser arriver la vapeur un peu plus de temps que ne l'indique la théorie; pendant les 0,60 de la course, par exemple, au lieu des 0,41; car on a alors le même effet qu'avec une machine, qui aurait coûté davantage, et le fourneau étant déjà échauffé, la vapeur que l'on consomme ainsi en sus exige proportionnellement moins de charbon pour sa production.

1069. L'équation (2) étant mise sous la forme Formule qui en résulte.

$$ab - 0{,}4\ a' - a = o,$$

on voit qu'en supposant à b la valeur donnée par la théorie, l'expression de la force d'une machine à détente se réduit à

$$131\ d^2\ nz\ ab\ \text{Log.}\frac{1}{b}. \qquad (3)$$

Supposons par exemple une machine travaillant à 7 atmo-

sphères et demie sans condensation, nous aurons $a = 7{,}5$, $a' = 1$, $b = 0{,}533$, $\text{Log}\ \frac{1}{b} = 0{,}625$; soit $d = 0^m, 35$ $n = 30$, $z = 1^m, 6$; la force sera de 1925^k élevés à 1^m par seconde.

Remarque sur la mesure de la tension.

1070. Dans l'application de ces formules, il faut observer que la valeur de *a* donnée par le manomètre est ordinairement inexacte ; la meilleure manière d'avoir *a* serait de déterminer la température, la table de Dulong (1019) donnerait ensuite la force élastique. Si on veut calculer, non pas la force que déploie la machine, mais celle qu'on a prétendu lui donner, la température maximum, en France du moins, se trouvera indiquée par les rondelles fusibles (1049).

Remarque sur le coefficient du déchet.

1071. Il est évident que le déchet doit varier d'une machine à l'autre, et même pour la même machine suivant qu'elle fonctionne avec plus ou moins de détente et suivant mille autres circonstances ; le coefficient 0,4 que nous avons admis est celui de *Tredgold* et des ingénieurs anglais ; celui de M. *Navier* est un peu plus petit. M. de Prony, qui a déterminé ce coefficient directement (1076) sur plusieurs machines, l'a trouvé très variable, et quelquefois même égal à 0,15 seulement, dans des machines très bien construites ; de sorte que les formules actuellement en usage ne donnent réellement qu'une grossière approximation.

Force d'une machine d'après le combustible employé.

1072. Nous en dirons autant de la mesure fondée sur la quantité de combustible consommé ; dans les meilleures machines à haute pression on brûle au moins 5^k de houille par heure pour une force de cheval, et 4^k dans les machines à basse pression en les supposant toujours bien construites. D'après cela, si on admet la proportion, il est facile de calculer la force ; si, par exemple, une machine à moyenne pression brûle 35^k de charbon par heure, on conclut qu'elle est à peu près de 10 chevaux.

Force d'une machine d'après l'effet produit.

1073. Quand une machine ne sert qu'à élever de l'eau, on a aisément sa force en jaugeant l'eau qu'elle élève. Ainsi, la pompe à feu de Chaillot fait monter par heure 1750 hectolitres d'eau à 36^m ou 1750^k à 1^m par $1''$, la force est donc d'à peu près 24 chevaux. Celle du Gros-Caillou, qui

élève par heure 542 hectolitres à 23m ou 342k à 1m par 1″, est de 4ch 61, en comptant toujours 75k par cheval. Du reste on voit que la force ainsi évaluée dépend de la bonne ou de la mauvaise construction des pompes que la machine fait mouvoir.

Force d'une machine par le frein de Prony. Fig. 326

1074. Le *frein de Prony* est considéré aujourd'hui comme le meilleur moyen de mesurer la force des machines à vapeur, et en général de toutes les machines qui font tourner des arbres. Les *mâchoires ab*, *a′ b′*, construites pour se faire équilibre, sont serrées sur l'arbre de couche C par les vis à écrous *a a′*, *b b′* de manière que le poids qu'on ajoute à l'une d'elles soit soutenu bien horizontalement par le frottement qui résulte de la rotation. Admettons que la circonférence D D′ soit d'un mètre, et que l'arbre fasse précisément un tour par seconde; pour peu qu'on serre les écrous davantage, le frein fera corps avec l'arbre qui dès lors enlèvera le poids en tournant d'ailleurs avec la même vitesse qu'auparavant, tant que la résistance ne changera pas; ce qui à la vérité ne durera qu'un instant. Mais il est certain que la résistance ne changerait pas si le poids pouvait continuer à agir perpendiculairement au même bras de levier pendant toute la rotation; d'où l'on voit que l'effet de la machine, en soutenant le poids horizontalement, revient lui faire parcourir un mètre par seconde en hauteur verticale. Maintenant il est clair que la force sera double si la machine soutient le poids quand la circonférence est double, et que la force doublera encore si le temps de la révolution est moitié moindre; d'où il suit que, pour avoir l'expression générale de la force, il faut multiplier le poids p par la circonférence qu'il tend à décrire, et diviser le produit par la durée de la révolution de l'arbre. La circonférence est $2\pi r$, r désignant le rayon C D mesuré en mètres; le temps de la révolution est $\frac{t}{n}$, en appelant n le nombre de tours pendant le temps t compté en secondes, de sorte qu'on a pour la force cherchée

$$\frac{2\pi r p n}{t}$$

kilogrammes, élevés à 1^m par $1''$; en divisant par 75 on aurait la force en chevaux. Soit $r = 2^m,214$, $t = 60''$, $n = 18$, $p = 70^k$; on sait que $\pi = 3,1416$; la force est donc 292^k ou $3^{ch},9$ à très peu près.

Précautions à prendre.

1075 Il y a plusieurs précautions à prendre dans l'emploi du frein; les surfaces frottantes doivent être métalliques, sans quoi elles s'useraient en peu d'instants; elles doivent être arrosées continuellement avec de l'eau froide pour qu'elles ne s'échauffent pas trop. Comme le frottement malgré cela varie d'un moment à l'autre, surtout quand la machine n'a pas de volant, souvent le poids monte ou descend, de sorte qu'on est obligé de serrer et de desserrer de temps en temps les écrous, pour maintenir la barre à peu près horizontale; l'arc qui est à son extrémité fait que le poids agit toujours avec le même bras de levier, pourvu que les excursions ne dépassent pas certaines limites. D'ailleurs, quoi qu'on fasse il reste toujours des oscillations qui établissent une différence notable entre le cas réel et le cas de la théorie, où on suppose le moment du poids tout-à-fait invariable; mais comme l'essai dure 5 ou 6 heures, on admet qu'il s'établit des compensations qui permettent de compter sur le résultat définitif. Une corde sans fin qui passe sur l'arbre fait marcher un compteur pendant l'expérience. Un ingénieur allemand, M. Egen, a remplacé une des mâchoires du frein par une chaîne en plaques de tôle articulées qu'on peut serrer ou desserrer plus facilement que les écrous.

Mesure du déchet dans les machines à vapeur.

1076. Quand on a mesuré la force f d'une machine à vapeur, il est facile de calculer le coefficient du déchet, car en égalant l'expression (1) à la force connue f et représentant par x le coefficient que nous avions supposé égal à a' 0,4, on tire :

$$x = b\left(1 + \text{Log.}\frac{1}{b}\right)\frac{1}{a}\left\{\frac{f}{131\, d^2\, n\, z} + a'\right\}$$

soit par exemple $a' = 1$, $a = 3^{atm}$, $b = 0,375$

Log. $\frac{1}{b}$ = Log. 2,67, = 0,982, $d = 0^m, 35$, $z = 0^m, 724$, $n = 36$, $f = 328^k, 75$; on trouvera $x = 0,15$.

CHAPITRE V.

VAPEURS CONSIDÉRÉES DANS L'AIR.

§ 1. *Phénomène de l'évaporation.*

1077. A proprement parler, l'*évaporation* consiste dans la formation de la vapeur à l'air libre et sans ébullition. L'évaporation est évidemment une conséquence de la propriété d'émettre des vapeurs dans le vide (997); l'air est passif dans le phénomène, et même au premier abord il semble qu'il devrait empêcher toute évaporation dans les circonstances ordinaires, puisque sa pression équivaut à 760mm de mercure, et surpasse par conséquent de beaucoup la tension habituelle de la vapeur. Mais il faut observer que la vapeur ne presse pas sur les liquides comme le ferait un piston imperméable, il présente des pores où la vapeur peut pénétrer. Il est vrai que la vapeur à saturation présente aussi des vides, et que cependant elle s'oppose à toute évaporation; mais, dans l'état de saturation la distance des molécules est précisément telle que la répulsion se change en attraction, pour peu que l'intervalle diminue; on ne pourrait donc pas introduire de nouvelles molécules sans donner lieu à une liquéfaction proportionnelle.

Ce qu'on entend par évaporation.

Pourquoi la pression de l'air n'empêche pas la vaporisation.

1078. Si l'air ne s'oppose pas entièrement à la formation des vapeurs, au moins il la gêne très notablement. Nous avons vu avec quelle rapidité la vaporisation se faisait dans le vide. Des expériences journalières nous

La vapeur se forme plus lentement que dans le vide.

prouvent qu'elle est beaucoup plus lente dans l'air. Ainsi on sait que l'eau exposée dans un vase ne disparaît complétement qu'au bout d'un temps fort long, quoiqu'il y ait un espace indéfini autour d'elle.

Expérience de Fontana. Fig. 327.

1079. Une expérience de Fontana fait encore très bien ressortir la différence que nous voulons signaler ; il mit la même quantité d'alcool dans deux cornues terminées par des récipients fermés et tout-à-fait pareilles, à cela près que l'une renfermait de l'air et que l'autre n'en contenait pas. Les ayant établies sur un bain de sable légèrement chauffé et ayant fait plonger ses récipients dans de l'eau froide, il vit la distillation marcher très vite dans la cornue vide d'air, tandis qu'elle était à peu près nulle dans l'autre.

Applications.

1080. Dans certaines sucreries on évapore les sirops par le procédé d'*Howard*, qui se réduit à entretenir le vide à l'aide de pompes dans un alambic muni de son serpentin. De cette manière on n'a pas besoin à beaucoup près d'une aussi forte chaleur que si l'on opérait sous la pression atmosphérique et le sucre se trouve bien moins altéré. Quand les chimistes ou les physiciens veulent évaporer certains liquides sans les chauffer, ils les mettent dans le vide, avec des substances capables d'absorber la vapeur à mesure qu'elle se forme. La viande ainsi desséchée peut se garder indéfiniment en conservant tout son goût.

La tension maximum est la même dans l'air que dans le vide. Fig. 328.

1081. Malgré la résistance que l'air oppose à la formation de la vapeur, celle-ci finit par acquérir dans un espace plein d'air la même tension que dans le vide à la même température. On peut s'en assurer en introduisant à l'aide d'un double robinet, assez d'eau pour saturer l'espace dans un grand ballon plein d'air sec, dont la douille est traversée par un baromètre à siphon. A mesure que la vapeur se forme, elle se mêle avec l'air comme le font les gaz dans l'expérience de Berthollet (593) et la pression augmente, car on voit le baromètre monter. Si on opère par exemple à 20°, on obtient une élévation de $17^{mm},3$, précisément égale à la dépression qu'on aurait eue dans le vide (1018). Ici, l'espace étant très grand, l'air ne change pas sensible-

ment de force élastique par le déplacement du mercure, de sorte que la variation du baromètre mesure exactement la tension de la vapeur. On voit dans cette expérience que la force de la vapeur s'ajoute à celle de l'air, et que les choses se passent comme si l'air et la vapeur étaient sans action l'un sur l'autre; mais, dans la réalité, il y a répulsion, ainsi que la résistance à la vaporisation le prouve ; seulement, comme la pression de l'air s'exerce également en tout sens sur les molécules de vapeur disséminées, elle ne tend nullement à produire une liquéfaction; dès lors on rentre dans le cas d'un gaz dont on condenserait deux parties dans le même espace; la tension totale doit être la somme des tensions partielles.

On pourrait encore tout simplement faire l'expérience dans un tube barométrique presque rempli d'air, où le mercure monterait seulement assez pour qu'on pût mesurer la dépression produite par la vapeur du liquide qu'on y introduirait; mais comme il résulte de cette dépression un changement de volume, il faudrait, avec la loi de Mariotte, tenir compte de la diminution de force qui en résulte pour le gaz. Dans le cas de deux vapeurs (1022) l'expérience est plus simple, parce que la saturation ayant toujours lieu, le changement de volume ne change pas la force élastique.

1082. Une conséquence bien remarquable des expériences précédentes, c'est qu'un vase vide ou plein d'air à une température déterminée contient toujours le même poids de vapeur quand il y a saturation ou plus généralement quand la vapeur dans les deux cas a la même force élastique. Nous avons pris pour exemple l'air et l'eau ; mais la vapeur de tout autre liquide atteindrait de même sa tension maximum dans tout autre gaz, pourvu qu'il n'y eût pas d'action chimique.

Un vase vide ou plein d'air peut contenir le même poids de vapeur.

1083. Nous venons de voir qu'il se formait en définitive autant de vapeurs dans un vase, soit qu'il fût vide, soit qu'il fût plein d'air; il n'en est plus de même dans un espace assez grand pour qu'on ait à tenir compte de la pression exercée par la vapeur en vertu de son poids: le mélange de

Cas d'un espace illimité.

l'air alors permet l'existence d'une plus grande quantité de vapeur. Aussi, comme le remarque M. *Poisson*, si l'atmosphère n'existait pas, il y aurait à la même température moins de vapeur autour de la terre qu'il n'y en a maintenant. Pour concevoir ce fait il faut observer que, dans le cas du vide, la quantité de vapeur serait limitée par la pression que pourrait supporter la couche inférieure. Si la température, par exemple, était de 10°, le poids de toute l'atmosphère de vapeur n'excéderait pas celui d'une couche de mercure de 9mm,5 (1018); si, au contraire, il y a de l'air, quelque soit le poids de la vapeur disséminée, la couche inférieure le supportera. Cela est évident, en supposant d'abord cette couche formée d'air sec; et il est certain que sa force ne diminuera pas quand on y vaporisera de l'eau. D'ailleurs, dans ce cas rien ne force à supposer qu'il y ait saturation, de sorte qu'on ne voit plus de limite.

Sans l'air il y aurait moins de vapeur autour de la terre.

Circonstances qui favorisent l'évaporation.

1084. Après avoir vu le rôle que l'air, supposé calme, joue dans l'évaporation, nous examinerons les circonstances qui influent sur la quantité de vapeur formée dans un temps donné.

1° Grandeur de la surface.

1085. Quand on chauffe un liquide jusqu'à le faire bouillir, l'expérience prouve qu'il se forme sensiblement la même quantité de vapeur, que le vase ait une ouverture large ou étroite; tout dépend alors de la *surface de chauffe*, c'est-à-dire de la surface qui est en contact avec le foyer. Au contraire, quand il y a simplement évaporation, tout dépend de la surface libre. Aussi l'on a bien soin de multiplier la surface partout où l'on veut favoriser l'évaporation. Les marais salants où on extrait le sel des eaux de la mer offrent une application remarquable de ce principe; dans les *bâtiments de graduation* surtout, l'eau des sources salées se trouve divisée à l'infini, en tombant à plusieurs reprises sur une couche épaisse de fagots d'épines, ou bien en coulant le long de plusieurs milliers de cordelettes.

2 Élévation de la température.

1086. Quand un espace est saturé, il semble qu'il n'y ait plus d'évaporation possible; mais, comme on le sait par des expériences vulgaires, on peut forcer la vapeur à s'élever du liquide en le chauffant. Il est vrai qu'elle se

condense d'abord dans l'air encore trop froid; mais toujours est-il qu'elle se forme. La table des tensions (1018) explique pourquoi la chaleur favorise tant l'évaporation; on y voit qu'un peu au-dessous de 100°, la tendance de la vapeur à se former est 150 fois aussi grande qu'à zéro, et que l'équilibre n'est plus possible entre la vapeur naissante et celle qui sature l'espace dès que le liquide est plus chaud que l'air, ou même dès que la température s'élève; aussi le grand moyen d'évaporation dans les arts est-il le chauffage. Les tissus encore tout humides se sèchent en un instant par leur passage sur des cylindres chauffés intérieurement; c'est par ce même procédé que le papier mécanique se trouve sec à mesure qu'il se fait. Si un soleil ardent dessèche les plantes et tout ce qu'il frappe, ce n'est point par une propriété particulière; c'est tout simplement que la chaleur augmente la tendance des liquides à se vaporiser.

1087. L'influence du degré de saturation, c'est-à-dire de la sécheresse ou de l'humidité de l'air sur l'évaporation, est de toute évidence. Lorsqu'on échauffe l'air saturé on peut dire qu'on le dessèche, quoiqu'on n'ôte rien de la vapeur qu'il contient déjà, car on lui donne la propriété d'en prendre une quantité nouvelle. Dans les étuves de raffineries de sucre, l'air contient certainement plus de vapeur qu'au dehors; cependant, comme il est chauffé à 40 ou 50°, on peut dire qu'il est plus sec. Nous nous servons ici des expressions consacrées par l'usage; mais à la rigueur c'est de l'*espace* plus ou moins sec, et non de l'air qu'il s'agit. Si l'évaporation se fait mieux dans un espace chaud, ce n'est pas que la substance de l'air y prenne réellement une propriété desséchante, puisque le phénomène aurait encore lieu dans le vide et même mieux; mais c'est tout simplement parce qu'à une haute température, la vapeur peut prendre une densité plus grande (1010); d'où il suit que dans un même espace il peut s'en former un poids plus grand.

3° Sécheresse de l'air.

1088. L'élévation de température dans un espace fermé serait un moyen fort borné d'évaporation, si on ne renou-

4° Renouvellement de l'air.

velait pas l'air. Au contraire, dans bien des cas ce renouvellement à lui seul peut suffire; aussi dit-on que le vent dessèche. Dans la réalité, son action se borne à balayer la vapeur déjà formée, de sorte que les surfaces humides se trouvent toujours dans un espace à peu près sec; cela suppose que le vent lui-même n'est pas humide: on sait très bien que quand il l'est, l'évaporation se fait mal. On peut faire voir l'influence du renouvellement de l'air en faisant tourner rapidement un linge humide avec une fronde; la dessiccation a lieu en quelques instants. Quand il n'y a pas de vent, l'air se renouvelle encore peu à peu, parce qu'il s'élève comme plus léger à mesure qu'il devient humide. Les séchoirs des blanchisseries sont de grands hangars terminés seulement par des jalousies, afin que l'air s'y renouvelle continuellement. Pour sécher dans les étuves, on laisse l'air chaud se saturer d'humidité, puis on ouvre des issues opposées pour qu'il se renouvelle. Dans quelques établissements, on établit un courant d'air chaud; les ouvertures d'entrée et de sortie sont au niveau du sol afin que l'air chaud qui tend toujours à s'élever soit forcé de parcourir tout l'espace. L'air s'échauffe en passant dans des tuyaux qui traversent un foyer; à la sortie de l'étuve se trouve un conduit vertical; quand une fois l'air humide et encore chaud remplit cette espèce de cheminée, il se produit un tirage (628) qui détermine le courant. Montgolfier évaporait très rapidement des jus de fruits à l'aide d'un courant d'air ordinaire produit par un ventilateur (564); ce courant traversait le liquide pendant sa chute sur de petites baguettes qui le divisaient à l'infini comme dans les bâtiments de graduation. On évapore aujourd'hui les sirops dans les sucreries à l'aide d'un courant d'air forcé qui s'élève du fond de la chaudière par une espèce de crible, et traverse toute la masse en petites bulles; de sorte qu'on emploie simultanément la chaleur, la multiplication des surfaces et le renouvellement de l'air. Dans les brasseries on dessèche l'orge germée en faisant passer au travers de la masse le gaz encore extrêmement chaud, résultant de la combustion d'une espèce de houille qui ne donne pas de fumée. Les

fours sur la sole desquels on évapore les dissolutions dans les fabriques de soude artificielle réunissent aussi des conditions très favorables, puisque le liquide, étendu en couche mince, reçoit immédiatement sur sa surface libre l'action de la flamme, qui n'est qu'un courant de gaz excessivement chaud. Quand on veut dessécher complétement des substances organisées pour des analyses, on les met dans un tube où l'on fait passer un courant d'air sec (922), jusqu'à ce qu'elles ne perdent plus rien de leur poids. On peut d'ailleurs opérer avec un tube recourbé, qui plonge dans un bain d'eau ou d'huile porté à la plus haute température que la substance puisse supporter; ce procédé vaut encore mieux que la dessiccation dans le vide

5°. Raréfaction de l'air.

1089. La formation des vapeurs, observée comparativement dans l'air et dans le vide, montre assez l'influence de la raréfaction. Aussi, toutes choses égales, l'évaporation se fait-elle bien plus rapidement sur les montagnes très élevées, et en général dans les hautes régions de l'air, malgré un froid très vif, comme l'a constaté M. Gay-Lussac (621); mais à la surface de la terre, les variations dans la pression de l'air sont trop petites pour avoir un effet appréciable, surtout au milieu de tant de causes perturbatrices.

Circonstances qui s'opposent à l'évaporation.

1090. On conçoit facilement pourquoi une couche d'huile mise sur l'eau s'oppose à l'évaporation : elle agit comme un piston imperméable, poussé par une force qui, à la température ordinaire, est bien supérieure à la tension du liquide. En général, quand on connaît les circonstances qui favorisent l'évaporation, on se rend aisément compte de celles qui la retardent; si l'herbe reste fraîche sous les arbres d'une forêt, tandis qu'elle est déjà desséchée dans les plaines ou sur les montagnes découvertes, c'est qu'un feuillage épais, en même temps qu'il arrête les rayons du soleil qui auraient augmenté la tension de la vapeur, limite un espace où l'air se rénouvelle à peine et où il est presque toujours saturé. Par des raisons semblables l'évaporation ne se fait pas dans les vallées profondes, dans les lieux bas et abrités; dans les caves surtout, où l'on a soin de placer tout ce dont on veut empêcher la dessiccation.

Les cloches que les jardiniers mettent sur les plantes, entre autres usages, arrêtent l'évaporation, quoique cependant la transpiration continue. On sait que quelques pierres amoncelées au pied d'un arbre sont fort utiles à cause de l'humidité qu'elles y entretiennent.

Mesure de l'évaporisation.

1091. C'est en général par la perte de poids qu'on mesure l'évaporation. Ainsi Dalton a trouvé par la différence de deux pesées que l'eau à 100° perdait en une minute $4^{gr},27$ par décimètre carré. Toutes choses égales, l'évaporation est proportionnelle à la surface, de sorte qu'il est plus simple d'indiquer l'épaisseur de la couche évaporée, l'eau étant supposée au maximum de densité, pour que les résultats soient comparables. Cette épaisseur se calcule aisément d'après le poids et la surface; ici, par exemple, elle est de $0^{mm},427$.

Résultats relatifs à l'eau.

1092. Par des expériences faites à Paris et aux environs, on a trouvé environ 90 centimètres pour l'évaporation annuelle d'une surface d'eau; c'est-à-dire que si l'eau n'était renouvelée, ni par la pluie, ni par la rosée, ni autrement, elle baisserait de $0^{m},9$ environ dans le cours de l'année; des expériences faites dans le midi de la France n'ont donné que $0^{m},81$ et en Angleterre $0^{m},7$ seulement. En adoptant 0,81 pour la zone tempérée, on a, terme moyen, $2^{mm},2$ par jour; il s'agit ici d'un jour proprement dit; car l'évaporation est à peu près nulle pendant la nuit. Dans la zone torride M. de Humboldt a trouvé en 12^{h} $5^{mm},4$ à l'ombre, et $8^{mm},8$ au soleil.

Résultats relatifs à la glace.

1093. Hauey, par un jour d'hiver fort sec a trouvé que l'évaporation sur la glace à l'ombre était de $0^{mm},82$ en 9^{h}; l'eau pendant ce temps perdait $1^{mm},21$.

Résultats relatifs au sol.

1094. La terre végétale, dans l'état moyen d'humidité où elle est entretenue naturellement, perd en un an une couche d'eau tout au plus égale à 24^{c} si elle est nue, et à 27^{c} si elle est couverte de végétation. L'évaporation n'a guère lieu que pendant le jour; celle de la nuit est souvent plus que compensée par la rosée.

Résultats relatifs aux végétaux.

1095. Hales s'est particulièrement occupé de l'évaporation par les feuilles. Voici les résultats de quelques ex-

périences faites pendant les mois de juillet et d'août; l'épaisseur de la couche évaporée en 12^h de jour est comptée en pouces anglais valant 25^{mm},4.

Citronnier $\frac{1}{243}$ Vigne $\frac{1}{11}$
Pommier $\frac{1}{204}$ Soleil $\frac{1}{165}$
Chou $\frac{1}{80}$

L'évaporation sur les fruits était à peu près la même que sur les feuilles. La surface totale des feuilles pour le soleil, dont il est ici question, était de 36223 centimètres carrés; l'évaporation moyenne en 12^h de jour allait à 567 grammes; le minimum était de 450^{gr} et le maximum de 793. Elle ne dépassait par 75^{gr} dans les nuits les plus chaudes et sans rosée sensible. Ce soleil sans les racines pesait 1350^{gr}, et 336 seulement après avoir été desséché.

1096. D'après les expériences de Sanctorius, les $\frac{5}{8}$ du poids des aliments sont perdus par l'évaporation qui se fait à la surface de la peau et dans les poumons. Seguin en 24^h perdait ainsi, terme moyen, 1375 grammes; 875 par l'évaporation cutanée, et 500 par l'évaporation pulmonaire; c'est, à peu près par minute 1^{gr}, 0^{gr},6 et 0^{gr},4. La plus grande perte totale était par minute de 1^{gr},7 et la plus petite de 0^{gr},58, ce qui répond en 24^h à 2448^{gr} et 835^{gr}. L'évaporation cutanée varie beaucoup d'un moment à l'autre; mais l'évaporation pulmonaire varie très peu. Tous ces résultats ont été pris pendant l'état de santé. Résultats relatifs à l'homme.

La surface de la peau étant à peu près de 17400 centimètres, 875^{gr} donnent pour l'épaisseur moyenne de la couche évaporée en 24^h, un demi-millimètre ou $\frac{10}{508}$ de pouce anglais. Hales, d'après les expériences de Keill, avait trouvé $\frac{1}{50}$.

Comme l'expérience le prouve, et comme on le conçoit facilement, c'est en été que notre évaporation est la plus abondante; aussi nous faut-il alors souvent une très grande quantité de liquide pour la compenser. Dans les étuves sèches on augmente artificiellement l'évaporation, et quelquefois d'une quantité énorme. Ainsi Berger et Laroche rapportent qu'étant restés 8' dans une étuve à 90° C, ils avaient perdu, l'un 190, et l'autre 220 grammes; par consé-

quent plus de 20 fois autant que dans les circonstances ordinaires. Dans une autre expérience, la perte du premier s'éleva à 390 gr en 13'. Dans les étuves humides, la transpiration continue, mais non plus l'évaporation puisque l'espace est saturé et à peu près à la même température que le corps.

Calcul de l'évaporation dans l'air tranquille.

1097. On doit à Dalton une formule empirique avec laquelle on calcule approximativement l'évaporation d'un liquide. Il admet que l'évaporation est proportionnelle à la différence entre la tension de liquide et celle de la vapeur qui est dans l'air. Par une expérience, il trouve une perte de 4 gr,27, par minute et par décimètre carré, l'air étant tranquille; la tension du liquide était de 760 mm et celle de la vapeur dans l'air de 10 mm; dans un autre cas où les tensions sont H et h, la perte p sera donnée par la proportion

$$4^{gr},27 : p :: 760 - 10 : H - h \text{ d'où } p = 0^{gr}00,56\,(H - h).$$

en négligeant 10 devant 760. On négligerait de même h si H était très grand. Nous verrons d'ailleurs dans l'hygromètre comment h se mesure. Dalton a trouvé que la proportion se vérifiait encore quand le liquide était exposé à un vent constant; mais alors on est obligé dans chaque cas de déterminer le coefficient par expérience.

Calcul de l'évaporisation dans l'air agité.

§ II. *Hygrométrie.*

Ce qu'on entend par hygrométrie.

1098. L'*hygrométrie*, comme l'étymologie l'indique, consiste dans la mesure de *l'humidité*. On entend ici par humidité la vapeur répandue dans l'espace ou dans l'air comme on le dit ordinairement.

Moyen de mettre en évidence l'eau contenue dans l'air.

1099. On peut montrer qu'il y a de l'eau dans l'air au moyen d'un vase rempli de glace, dont les parois en peu d'instants se couvrent d'une rosée provenant de la vapeur

liquéfiée par le froid; l'eau coule bientôt goutte à goutte. Ce moyen serait insuffisant si la température était à 0°; mais alors on ajouterait du sel à la glace, et on verrait se former sur les parois une gelée blanche de plusieurs millimètres d'épaisseur, qui augmenterait sensiblement le poids du vase. Pendant ces expériences on aperçoit une espèce de fumée due à ce que la vapeur refroidie à distance, au milieu de l'air, prend la disposition vésiculaire. Pendant l'été, les bouteilles qu'on remonte de la cave se couvrent à plusieurs reprises d'une couche de rosée, quoiqu'on ait soin de les essuyer. C'est évidemment la vapeur contenue dans l'air qui se précipite sur le verre, dont la température est au-dessous de celle où l'air serait saturé. C'est par la même raison que les verres des lunettes s'obscurcissent tout à coup quand on entre pendant l'hiver dans un lieu chaud et un peu humide.

Substances hygrométriques.

1100. On constate encore la présence de l'humidité dans l'air, à l'aide de diverses substances qu'on appelle *hygrométriques*, à cause de la propriété qu'elles ont d'absorber la vapeur contenue dans l'air, ce qui peut servir à en mesurer la quantité. Toutes les substances végétales ou animales un peu sèches sont dans ce cas. Le bois, les divers tissus, les graines, la laine, la corne, l'ivoire même, mis quelque temps dans un lieu humide, augmentent considérablement de poids; c'est même un moyen de fraude fort souvent employé. La plupart des substances minérales sont encore hygrométriques à un certain degré; les pierres, le marbre, le verre même augmentent de poids dans un temps humide, mais le phénomène est surtout bien marqué pour la terre végétale, certaines ardoises, l'argile et en général les minéraux très poreux. L'acide sulfurique concentré, exposé à l'air dans un vase largement ouvert, peut en quelques jours absorber 12 ou 15 fois son poids d'eau, surtout si on a soin d'agiter de temps en temps pour renouveler la surface. La chaux, comme on sait, se réduit en poudre à l'air, à cause de l'eau qu'elle absorbe. Quand une substance solide se résout en liqueur par l'humidité qu'elle prend dans l'air, on dit qu'elle est *déliquescente*; c'est le cas de la potasse caustique,

du chlorure de calcium, de l'acide phosphorique, etc. Certains liquides volatils manifestent la présence de l'eau dans l'air, parce qu'en s'unissant à la vapeur qu'ils rencontrent, ils forment une combinaison moins volatile que chacun des composans et qui apparaît sous forme de fumée. Ce phénomène est très marqué pour les acides hydrochlorique, nitrique, sulfurique anhydre et fluoborique. Les deux derniers surtout peuvent être regardés sous ce rapport comme des réactifs extrêmement délicats. Il est bien prouvé du reste que les vapeurs de ces liquides fumants ne sont plus visibles dans un espace sec.

Hygroscopes. 1101. On donne le nom d'*hygroscopes* à différents appareils qui font reconnaître s'il y a plus ou moins d'humidité dans l'air. Leur construction varie à l'infini; l'indication des uns dépend d'un changement de poids; pour les autres, c'est un changement de forme ou de volume. Ainsi des éponges, certains fucus mis dans le bassin d'un peson bien sensible (335) font marcher l'aiguille dans tel ou tel sens, suivant qu'ils absorbent plus ou moins d'humidité; un tuyau de plume, fermé par un bout et rempli de mercure, change de dimension suivant que l'air est plus ou moins sec. On rend ses variations sensibles en l'ajustant à un tube capillaire; la balle extérieure dans l'avoine porte une arête qui se tord et détord par les changements d'humidité; et il est facile de rendre ces mouvements sensibles en y adaptant un index léger. Le *calendula pluvialis* ou *souci-hygromètre* se ferme quand l'air devient humide. Par l'humidité les cheveux s'allongent; au contraire les cordes de chanvre se raccourcissent et se détordent. Il en est de même des cordes à boyau, et c'est sur leur torsion que sont fondés les hygroscopes qu'on rencontre le plus souvent. Ce sont de petites figures de carton, dont la tête se couvre ou se découvre, suivant que l'air est plus ou moins humide. Ce mouvement est dû à un petit morceau de corde à boyau de 2 ou 3 centimètres, dont un bout est fixe et dont l'autre porte la pièce mobile. Ces instruments sont vendus pour annoncer la pluie; mais ils indiquent seulement l'humidité, que la pluie ne suit pas toujours.

1102. Le véritable problème de l'hygrométrie consiste à trouver le rapport entre la vapeur que l'air contient et celle qu'il contiendrait s'il était saturé. C'est ce rapport qu'on appelle le *degré* d'humidité ; on donne le nom *d'hygromètres* aux instruments qui le font connaître. Les hygromètres actuellement connus ne font pas immédiatement connaître le degré d'humidité ; ils donnent seulement des indications d'après lesquelles on peut le trouver.

Ce que c'est que le degré d'humidité.

Les hygromètres actuels ne le donnent pas immédiatement.

1103. Le meilleur hygromètre est celui de *Saussure*; qu'on appelle aussi *hygromètre à cheveu*, parce qu'il est fondé sur la propriété qu'ont les cheveux convenablement préparés de prendre pour chaque degré de saturation de l'air une longueur déterminée à laquelle ils reviennent toujours exactement. La partie essentielle de l'instrument est donc un cheveu *a b* qu'on dispose de manière à voir facilement de très petites variations dans sa longueur. Pour cela, il est attaché à un point fixe *a* par un bout, et par l'autre à une poulie qu'un petit contre-poids C tend toujours à faire tourner, de sorte qu'il reste légèrement tendu. S'il vient à se raccourcir, il fait tourner la poulie dans un sens malgré le petit contre-poids ; si au contraire il s'allonge, le contre-poids produit une rotation en sens contraire. La poulie porte une aiguille *m n*, dont l'extrémité décrit un arc S H divisé en 100 parties appelées degrés. Le 100e degré, qui est ici en haut, indique l'humidité extrême : on voit par la manière dont le cheveu est attaché que l'aiguille monte de ce côté quand il y a allongement. Le zéro qui est en bas indique l'extrême sécheresse. Un cadre de cuivre ABCD supporte toutes les pièces et de plus un petit thermomètre *t*. L'hygromètre se suspend dans le lieu où l'on veut faire une observation : quand l'aiguille est stationnaire, on note sa position et en même temps le degré du thermomètre. Il faut éviter d'humecter le cheveu en respirant de trop près. Pour faire voyager l'instrument, avant de le mettre dans la boîte on soulève le contre-poids *c*, et on le fixe par la pince P, ainsi que la poulie ; de cette manière le cheveu ne risque pas de se casser ou de se distendre.

Hygromètre de Saussure.

Fig. 329.

Comment on prend une observation.

Construction et graduation.

1104. La préparation des cheveux pour les hygromètres consiste à les faire bouillir quelques minutes dans de l'eau contenant $\frac{1}{100}$ de sous-carbonate de soude ; on leur enlève ainsi une matière grasse qui les rend moins sensibles à l'humidité. Avant cette préparation, ils ne se dilatent guère que de $\frac{1}{200}$ en passant de la sécheresse extrême à l'humidité extrême; mais quand ils sont bien préparés, la dilatation peut aller jusqu'à $\frac{1}{45}$. Il y a ordinairement 10 pouces ou 27 centimètres entre les points d'attache, de sorte que l'allongement absolu est de 6 millimètres à peu près. Le cheveu étant placé, voici comment on marque les deux points fixes. Pour avoir l'humidité extrême, il suffit d'enfermer l'instrument pendant quelques heures sous une cloche humide posée sur une assiette pleine d'eau ; quand l'aiguille est stationnaire, on la place au moyen de la vis V, pendant que la saturation subsiste, sur le point où l'on veut marquer 100°. Cette vis ne fait que déplacer le point d'attache *a* du cheveu, qui ne se trouve ni plus ni moins tendu dans cette nouvelle position que dans l'autre. La sécheresse extrême s'obtient un peu plus difficilement : il faut, après avoir laissé l'instrument se sécher à l'air, l'établir sous le récipient de la machine pneumatique, au-dessus d'un large vase rempli de petits fragments de chlorure de calcium. Quand il est resté ainsi 24 heures dans le vide sec, le cheveu a généralement perdu toute son humidité ; on peut d'ailleurs s'assurer qu'en échauffant un peu le récipient, on ne fait pas marcher l'aiguille vers une sécheresse plus grande ; ce qui aurait lieu s'il restait de l'humidité, puisque le seul effet de la chaleur serait d'éloigner encore le point de saturation (1018). Comme on a eu soin de tracer des divisions arbitraires sur l'arc SH on peut noter exactement la position de l'aiguille. On a ainsi le zéro ; supprimant ensuite les divisions arbitraires, on divise l'intervalle entre les deux points fixes en 100 parties égales.

L'influence de la température est négligeable.

1105. Nous n'avons point indiqué de température particulière pour faire la graduation de l'hygromètre, parce qu'on trouve toujours à peu près les mêmes points fixes en opérant dans les limites des températures atmosphé-

riques; ainsi, nous admettrons qu'à 10 ou à 20°, le cheveu prend la même longueur dans un espace saturé : mais en est-il de même pour les degrés intermédiaires de saturation? Quand le cheveu contiendra par exemple la moitié de l'humidité qu'il peut contenir, prendra-t-il la même longueur à 10 ou à 20°? L'expérience seule pouvait décider la question, et heureusement cette simplicité de marche peut être admise sans grande erreur, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac, Dulong et Melloni. Il est bon cependant de savoir que la chaleur allonge le cheveu et agit par conséquent pour faire croire à une humidité un peu plus grande que celle qui existe réellement.

Sens dans lequel elle agit.

1106. Comme le cheveu ne peut contenir qu'un poids déterminé d'eau, il est tout simple que, dans un espace saturé, il en absorbe toujours le même poids quoiqu'il y en ait autour de lui des quantités fort différentes, suivant que la saturation a lieu à telle ou telle température; mais pourquoi ne se sature-t-il pas toujours puisqu'il y a bien assez d'eau pour cela même dans un espace non saturé? C'est que la force de l'absorption est contrebalancée par la tendance de l'eau à se vaporiser; cette tendance est nulle quand l'air est saturé; alors la force d'absorption a tout son effet jusqu'à ce qu'elle devienne nulle elle-même. Mais quand l'espace n'est pas saturé, la force d'absorption, qui diminue à mesure que le cheveu s'humecte, finit par se trouver égale à la force de la vaporisation, et dès lors le cheveu ne prend plus rien, quoiqu'il n'ait pas toute l'eau qu'il peut contenir.

Pourquoi le cheveu ne se sature pas toujours.

1107. Il faut bien se garder de confondre le degré de l'hygromètre avec le degré d'humidité; quand on lit par exemple 60°, on ne peut pas dire que l'air contient les 60 centièmes de l'humidité qu'il pourrait contenir; ni le double de ce qu'il contiendrait si on avait eu 30°; cette indication 60° *détermine* seulement un certain degré d'humidité, mais sans le faire connaître. Pour avoir le degré d'humidité, il faut recourir à la table suivante qui est due à M. Gay-Lussac :

Passer du degré de l'hygromètre au degré d'humidité.

1108. *Table des degrés d'humidité.*

Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.
0	0,00	34	17,10	68	44,89
1	0,45	35	17,68	69	46,04
2	0,90	36	18,30	70	47,19
3	1,35	37	18,92	71	48,51
4	1,80	38	19,54	72	49,82
5	2,25	39	20,16	73	51,14
6	2,71	40	20,78	74	52,45
7	3,18	41	21,45	75	53,76
8	3,64	42	22,12	76	55,25
9	4,10	43	22,79	77	56,74
10	4,57	44	23,46	78	58,24
11	5,05	45	24,13	79	59,73
12	5,52	46	24,86	80	61,22
13	6,00	47	25,59	81	62,89
14	6,48	48	26,32	82	64,57
15	9,96	49	27,06	83	66,24
16	7,46	50	27,79	84	67,92
17	7,95	51	28,58	85	69,59
18	8,45	52	29,38	86	71,49
19	8,95	53	30,17	87	73,39
20	9,45	54	30,97	88	75,29
21	9,97	55	31,76	89	77,19
22	10,49	56	32,66	90	79,09
23	11,01	57	33,57	91	81,09
24	11,53	58	34,47	92	83,08
25	12,05	59	35,37	93	85,08
26	12,59	60	36,28	94	87,07
27	13,14	61	37,31	95	89,06
28	13,69	62	38,34	96	91,25
29	14,23	63	39,36	97	93,44
30	14,78	64	40,39	98	95,63
31	15,36	65	41,42	99	97,81
32	15,94	66	42,58	100	100,00
33	16,52	67	43,75		

Je trouve, par exemple, que quand l'hygromètre marque 60° l'air contient les 36 centimètres plus une fraction de l'humidité qu'il pourrait contenir à la température où se fait l'observation. On voit, en parcourant la table,

que l'effet de l'humidité sur le cheveu est de moins en moins grand à mesure que l'on approche du point de saturation.

1109. Le procédé de M. Gay-Lussac, pour la construction de la table précédente, est fondé sur ce qu'en ajoutant à l'eau de l'acide sulfurique ou certains sels, on diminue autant qu'on veut la densité de la vapeur qui reste cependant formée d'eau pure. D'après cela, pour avoir le degré d'humidité correspondant à un degré de l'hygromètre, on fait un mélange d'acide sulfurique concentré et d'eau en proportions quelconques, mais connues, et on en introduit un échantillon dans la chambre barométrique. Si quand l'espace est saturé la dépression est, par exemple, de 1^{mm}, 895 à la température de 10°, c'est-à-dire $\frac{1}{5}$ de celle produite par l'eau pure (1018), on conclut (1002) que les densités sont aussi dans le rapport de 1 à 5 et que l'espace contient seulement la cinquième partie de l'humidité qu'il pourrait contenir. On suspend ensuite l'hygromètre dans un vase fermé, au-dessus d'une couche épaisse du même mélange acide; l'excès de vapeur, s'il y en avait, se trouve bientôt absorbé sans changer sensiblement les proportions du mélange, de sorte que, quand l'aiguille reste stationnaire, on peut affirmer que l'air contient les 20 centièmes de l'humidité qu'il pourrait contenir, et on lit le degré correspondant de l'hygromètre. En recommençant cette série d'expériences, avec d'autres proportions d'acide, on a autant de termes de comparaison que l'on veut. Les degrés de l'hygromètre ainsi trouvés sont en général fractionnaires; mais un calcul d'iuterpolation donne la correspondance pour les degrés entiers.

Construction de la table.

1110. L'indication moyenne de l'hygromètre au niveau des habitations est de 72°, de sorte que, terme moyen, l'air est à moitié saturé. La saturation dans l'atmosphère n'est presque jamais complète; même après une grande pluie, l'aiguille ne dépasse guère 95°, ce qui répond à 0,9 d'humidité. Dans les plus grandes sécheresses l'air contient encore environ $\frac{1}{6}$ de la vapeur nécessaire à sa saturation, car jamais l'hygromètre ne descend au-dessous de 30° à la surface de la terre. Dans son voyage aérostatique, M. Gay-Lussac

Observations hygrométriques.

l'a vu à 26° à une hauteur de 6000^{m}; le degré d'humidité était donc $\frac{1}{8}$ seulement. Sur le sommet des Alpes, Saussure n'a jamais vu l'hygromètre au-dessus de 40°, d'où il suit que l'air à cette hauteur ne contient pas le quart de l'humidité qu'il pourrait contenir. D'après la marche de l'hygromètre pendant l'ascension de M. Gay-Lussac, on peut, en représentant par 100 l'humidité de l'air à la surface de la terre, former le tableau suivant de son humidité à différentes hauteurs:

Décroissement de l'humidité à mesure qu'on s'élève.

A la surface.	100	à 4000^{m}.	21
1000^{m}.	80	5000.	12
2000.	62	6000.	9
3000.	42	7000.	7

Tension de la vapeur dans l'air.

1111. Nous pouvons maintenant connaître sans peine la tension de la vapeur contenue dans un espace donné. Si l'hygromètre marque 30° nous concluons par la table des degrés d'humidité que la tension actuelle forme 0,20 de la tension maximum. Celle-ci nous est donnée par une table (1018) quand nous connaissons la température, de sorte que, si le thermomètre est à 20°, la tension cherchée est 0,17^{mm}, 3 × 0,20 = 3^{mm} 46. Quand on a trouvé cette tension h, l'expression $\frac{284h}{267+t}$ donne immédiatement en milligrammes le poids de la vapeur contenue dans un litre d'air à la température t que l'on considère (1010) (1082).

Poids de la vapeur contenue dans un espace donné.

Remarque.

1112. Dans les circonstances atmosphériques ordinaires, du moins entre 0 et 27°, la force élastique de la vapeur estimée en millimètres donne immédiatement, à moins d'un milligramme, le poids de la vapeur contenue dans un litre d'air, exactitude bien suffisante en général dans les questions d'hygrométrie. À 17° l'exactitude serait absolue puisque le facteur de h se réduirait à l'unité.

Poids d'un volume donné d'air humide.

1113. Quant au poids d'un litre d'air humide, il est facile à calculer, puisque c'est la somme des poids d'un litre d'air sec (943) et d'un litre de vapeur; il faut seulement observer que la force élastique de l'air sec n'est alors que la différence H-h

entre la hauteur du baromètre et la tension de la vapeur.

$$\text{On a ainsi } 1^{er},3 \times \frac{\dfrac{H-\frac{3}{8}h}{760}}{1+\dfrac{t}{267}} = \frac{0{,}456\,H - 0{,}172\,h}{267+t}$$

Densité de l'air humide.

1114. Si on veut l'expression générale de la densité de l'air humide, il n'y a qu'à prendre le rapport entre les poids d'un litre d'air humide et d'un litre d'air sec; ce rapport, qui est indépendant de la température, se réduit à $1 - \frac{3h}{8H}$; d'où il suit que l'air humide est toujours plus léger.

Correction de l'humidité.

1115. Pour calculer le volume auquel se réduirait une masse d'air humide si on venait à la dessécher, il faut observer que l'air du mélange qui supportait d'abord la pression H-h, supporte à lui seul la pression H tout entière après la dessication. Or en désignant par V et v les volumes correspondants, on a par la loi de Mariotte

$$H-h : H :: v : V;\ \text{d'où}\ v = V\left(1-\frac{h}{H}\right).$$

Si, par exemple, on a recueilli sur l'eau dans une cloche graduée un litre d'air à 18°,75, sous la pression de 760mm, on pourra considérer cet air comme saturé; la table des tensions donnera par un petit calcul $h = 16$, d'où $v = 0^{l},9789$.

Volume que prend l'air en devenant humide.

1116. La proportion résout évidemment la question inverse, c'est-à-dire qu'elle fait connaître ce que deviendrait un volume v d'air sec sous la pression H, si on y introduisait de la vapeur ayant la tension h; l'inconnue alors serait V, et on aurait

$$V = \frac{vH}{H-h} = 1^{l},0215$$

en supposant $v = 1^{l}$ $H = 760$ et $h = 16$.

Hygromètre de Daniel. Fg. 330. Ce que c'est que le point de rosée.

1117. Après l'hygromètre de Saussure, c'est celui de Daniel qu'on rencontre le plus fréquemment. Il est fondé sur ce que le degré d'humidité de l'air se calcule aisément quand on connaît le *point de rosée* c'est-à-dire la tem-

pérature où l'air est saturé, et où par conséquent la vapeur commence à se déposer. Il se compose de deux boules de verre communiquant par un tube recourbé assez large. La boule inférieure est aux deux tiers pleine d'éther, où plonge un petit thermomètre; on a chassé l'air du reste de l'appareil par l'ébullition, la boule supérieure est couverte d'une mousseline sur laquelle on verse de l'éther, qui produit du froid en s'évaporant. Dès lors l'éther intérieur vient s'y condenser par une véritable distillation, et la boule inférieure se trouve à son tour refroidie. Il arrive un moment où la vapeur ambiante commence à s'y déposer. On note alors le degré marqué par le thermomètre intérieur; ce degré indique sensiblement la température de l'air en contact avec la boule, et cette température, d'après les expériences de Dalton, est d'un demi-degré au-dessous du point de rosée. On peut encore, pour avoir ce point, attendre le moment où la vapeur déposée disparaît, et prendre la moyenne des deux indications thermométriques. Comme la boule est en verre opaque, la vapeur la ternit comme un miroir, et on saisit assez facilement l'instant de l'apparition et de la disparition de la rosée; celle-ci forme d'abord une zone circulaire au niveau du liquide. Supposons qu'on ait trouvé ainsi le point de rosée à 11° et que la température de l'air donnée par un thermomètre extérieur qui fait ordinairement partie de l'instrument soit de 25°, on cherchera les tensions correspondantes (1018) et leur rapport $\frac{10}{23} = 0{,}44$ donnera le degré d'humidité.

Manière de prendre une observation.

Théorie.

1118. En effet, nous venons de constater que si l'air qui est maintenant à 25° descendait à 11°, il serait saturé; mais dans l'état de saturation la tension de la vapeur est donnée par la table; c'est ici 10^{mm}. Le refroidissement ne l'a pas changée, puisqu'il ne change pas les proportions des deux gaz et que la pression atmosphérique qu'ils supportent proportionnellement reste la même pendant l'expérience, ainsi, nous pouvons affirmer que dans l'air à 25° la tension de la vapeur est actuellement de 10^{mm}; ce qui donne $\frac{284 \times 10}{267 + 25}$ pour le poids d'un litre de cette vapeur (1010). Mais le poids de toute la vapeur que pourrait contenir un litre d'air

saturé à cette même température de 25° est $\frac{284 \times 28}{267 \times 25}$; donc $\frac{10}{23}$, qui est le rapport de ces deux poids sera évidemment le degré d'humidité.

1119. Quand on a le degré d'humidité on peut trouver le degré correspondant de l'hygromètre de Saussure avec la table suivante; on contrôle ainsi les deux instruments l'un par l'autre.

Table pour la comparaison des deux hygromètres.

Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.	Degré d'humidité.	Degré de l'hygromètre.
0	0,00	34	57,42	68	84,06
1	2,19	35	58,58	69	84,64
2	4,37	36	59,61	70	85,22
3	6,56	37	60,64	71	85,77
4	8,75	38	61,66	72	86,31
5	10,94	39	62,69	73	86,86
6	12,93	40	63,72	74	87,41
7	14,92	41	64,63	75	87,95
8	16,92	42	65,53	76	88,47
9	18,91	43	66,43	77	88,99
10	20,91	44	67,34	78	89,51
11	22,81	45	68,24	79	90,03
12	24,71	46	69,03	80	90,55
13	26,61	47	69,83	81	91,05
14	28,51	48	70,62	82	91,55
15	30,41	49	71,42	83	92,05
16	32,08	50	72,94	84	92,54
17	33,76	51	72,21	85	93,04
18	35,43	52	73,68	86	93,52
19	37,11	53	74,41	87	94,00
20	38,78	54	75,14	88	94,48
21	40,27	55	75,87	89	94,95
22	41,76	56	76,54	90	95,43
23	43,26	57	77,21	91	95,90
24	44,75	58	77,88	92	96,36
25	46,24	59	78,55	93	96,82
26	47,55	60	79,22	94	97,29
27	48,86	61	79,84	95	97,75
28	50,18	62	80,46	96	98,20
29	51,49	63	81,08	97	98,69
30	52,81	64	81,70	98	99,20
31	53,96	65	82,32	99	99,55
32	55,11	66	82,90	100	100,00
33	56,27	67	83,48		

§ III. *Météores aqueux.*

Ce qu'on entend par météores aqueux. 1120. On entend, en général, par *météores* des phénomènes qui se passent à une certaine hauteur dans l'atmosphère; et par *météores aqueux* ceux dans lesquels l'eau joue le principal rôle.

Rosée. 1121. La rosée est cette humidité dont les corps se couvrent dans l'air, à cause du refroidissement. On peut constater directement qu'après le coucher du soleil, certains corps se refroidissent plus que l'air; et il n'y a rien d'étonnant à ce qu'ils se couvrent d'humidité, d'après ce que nous avons vu précédemment (1099). Quant aux causes mêmes du refroidissement, nous les examinerons en parlant du rayonnement de la chaleur.

Gelée blanche. 1122. La gelée blanche consiste dans la congélation de la rosée. Pour qu'elle ait lieu, il suffit que les corps sur lesquels se forme la rosée soient au-dessous de 0° (1099); l'air peut rester au-dessus de cette température.

Serein. 1123. La vapeur contenue dans l'air peut se liquéfier sans le contact d'un corps froid. Si le point de saturation est à peine dépassé, la transparence de l'air n'est pas troublée par les vésicules isolées qui se forment alors. C'est en cela que consiste le *serein*, qui n'est à proprement parler qu'un brouillard invisible formé après le coucher du soleil.

Brouillards. 1124. Les brouillards sont des amas assez denses de vapeur vésiculaire (987) étendus au-dessus du sol en couche ordinairement peu épaisse; de sorte qu'on se trouve souvent au-dessus d'eux, en s'élevant sur une petite colline où sur un édifice. Les circonstances de leur formation sont quelquefois très simples; ainsi, ceux qu'on voit sur les rivières, sur les étangs, etc., se forment précisément comme la fumée qui s'élève d'un vase plein d'eau chaude; en effet, pendant ces brouillards, on trouve généralement l'eau plus chaude que l'air. Quant à la formation de la vapeur vésiculaire, il faut dans ce cas concevoir que l'air humide et chaud qui est en contact avec le liquide monte comme plus léger, se mêlant à l'air froid qui est au-dessus

et qui afflue latéralement. Pour que la vapeur prenne alors la disposition vésiculaire, il suffit que la température du mélange soit assez basse pour qu'il y ait sursaturation. Dans les mers polaires, où les eaux sont toujours chaudes par rapport à l'air, il y a des brouillards presque perpétuels auxquels on donne le nom de *brumes polaires*.

Brouillards sur les eaux.

1125. Les brouillards sur le sol se forment au contraire quand celui-ci est plus froid que l'air; les choses se passent alors comme autour d'un vase contenant un mélange réfrigérant (1099). C'est surtout dans les prairies où l'air s'est saturé d'humidité à une haute température, qu'on voit ces brouillards se manifester le soir après le coucher du soleil.

Brouillards sur le sol.

1126. Les brouillards qui précèdent et accompagnent ordinairement le dégel se forment à peu près de même par un vent tiède qui amène de l'air humide dans une atmosphère froide, contre un sol et des édifices depuis longtemps refroidis.

Brouillards pendant le dégel.

1127. Enfin, certains brouillards qui ont une grande épaisseur sont évidemment dus à l'abaissement des nuages arrivés peu à peu au niveau du sol. Ils se manifestent sans changement notable dans la température et sans qu'il y ait de vent.

Brouillards par la descente des nuages.

1128. On donne le nom de *bruine* à une petite pluie très fine qui résulte de la liquéfaction d'un brouillard. Quand la température est très basse, le brouillard produit le *givre*, qui consiste en petites aiguilles de glace dont les corps froids se trouvent hérissés.

Bruine. Givre.

1129. Les nuages sont des amas de vapeur vésiculaire, qui ne diffèrent des brouillards que parce qu'ils sont suspendus dans l'atmosphère. Leur suspension est analogue à celle des montgolfières ; elle est due à ce qu'ils contiennent de l'air plus chaud, et par conséquent plus léger que l'air environnant. Cet excès de chaleur vient principalement de ce que les nuages interceptent les rayons du soleil ; ils s'abaissent souvent le soir et pendant la nuit, on les traverse souvent en s'élevant sur des montagnes médiocres et on les voit alors comme un brouillard à ses pieds. Nous savons

Nuages. Leur suspension.

qu'ils peuvent descendre jusqu'à terre ; généralement ils se tiennent à 1000 ou 1200 mètres, mais d'autres s'élèvent beaucoup plus (621).

Leur formation. 1130. Les nuages se forment par le mélange de deux masses d'air humide ayant des températures différentes. Il est à remarquer qu'il y a toujours sursaturation et par conséquent formation de vapeur vésiculaire lors du mélange de deux couches saturées quelque petite que soit la différence de température. Cela tient à ce que la densité maximum de la vapeur à la température du mélange est toujours moindre que la densité moyenne du mélange, ainsi qu'on peut s'en assurer par la table des tensions (1108). Mais ce cas de saturation complète n'est pas le plus ordinaire dans les hautes régions.

Formation de la pluie. 1131. La pluie provient évidemment de la liquéfaction des nuages, c'est-à-dire de la transformation des vésicules en gouttes. L'accumulation de la vapeur vésiculaire, l'agitation produite par des courants de directions différentes sont les causes principales de la formation de la pluie. On a lieu de croire que l'électricité joue aussi un rôle important dans ce phénomène.

Causes occasionnelles. 1132. La cause occasionnelle la plus fréquente de la pluie est l'arrivée d'un vent humide. En France par exemple, les vents de l'ouest et du sud, qui ont balayé les mers et qui ont une température assez élevée, apportent une quantité considérable de vapeurs qui, se refroidissant dans notre atmosphère, forment des nuages et par suite de la pluie. Les localités ont une influence évidente sur la pluie ; aussi il pleut très rarement à Madrid, presque jamais dans la Basse-Egypte.

Udomètre. Fig. 325. 1133. On mesure la pluie en la recevant dans un vase qu'on appelle *udomètre*, à cause de cet usage ; c'est un cylindre à double fond : la partie supérieure fait fonction d'entonnoir, et l'inférieure de réservoir ; un tube latéral donne la hauteur de l'eau. Le même instrument reçoit la neige et la grêle.

Quantité annuelle de pluie. 1134. Voici la quantité moyenne d'eau qui tombe annuellement dans différens lieux :

	Centimètres.		Centimètres.
Cap français (Saint Domingue).	308	Viviers......	92
La Grenade (Aux Antilles)....	284	Lyon	89
Tivoli (Saint-Domingue)......	273	Liverpool....	86
Garfagnana (duché de Modène.	249	Manchester...	84
Bombay..................	208	Venise.......	81
Calcutta..................	205	Lille.........	76
Kendal (Angleterre)........	156	Utrecht......	73
Gênes....................	140	La Rochelle..	66
Charlestown..............	130	Londres......	53
Pise....................	124	Paris........	50
Milan....................	96	Marseille.....	47
Naples...................	95	Pétersbourg...	46
Douvres..................	95	Upsal.......	43

1135. La hauteur donnée pour Paris est la moyenne de plus de 100 années d'observations; elle se rapporte à l'udomètre placé sur la terrasse de l'Observatoire; il est bon de savoir qu'un udomètre situé dans la cour reçoit, terme moyen, 6 centimètres de plus. Le fait du reste paraît général: la quantité de pluie est moins grande dans les lieux élevés. Nous remarquerons que d'une année à l'autre la quantité de pluie varie quelquefois du simple au double et qu'un seul orage peut donner la moitié de ce qui doit tomber dans l'année entière. Aussi les années communément appelées pluvieuses ne sont pas toujours celles où il tombe le plus de pluie, mais plutôt celles où la pluie tombe plus fréquemment. On voit d'après le tableau, qu'en général la quantité de pluie augmente à mesure qu'on se rapproche de l'équateur; c'est à peu près l'inverse pour le nombre des jours de pluie, de sorte que dans la zone torride il tombe souvent en une seule journée des quantités énormes d'eau. Observations.

1136. D'après des calculs très exacts faits pour diverses localités, la quantité annuelle de pluie suffit largement à l'alimentation des divers cours d'eau, lors même qu'on tient compte des pertes faites par l'évaporation ou autrement. On ne doit donc pas chercher ailleurs l'origine des fleuves Origine des fontaines.



et des fontaines. On sait d'ailleurs que les sources tarissent ou diminuent notablement dès qu'on reste pendant quelques mois sans pluie.

Neige. 1137. La neige se forme dans les hautes régions de l'atmosphère, où nous savons que la température est bien au-dessous de zéro. Les nuages qui s'élèvent jusque là se gèlent peu à peu; de l'air moins froid que l'air ambiant reste emprisonné dans cet assemblage de petites aiguilles de glace, de sorte que l'ensemble peut encore se soutenir; l'existence de nuages formés ainsi de petits glaçons est démontrée par certains phénomènes d'optique. Mais la vapeur peut aussi se geler directement et sans passer par l'état vésiculaire, il suffit pour cela que le froid soit très grand; si alors l'air est tranquille, les molécules de glace se groupent par leurs faces de plus grande attraction et la neige se présente en cristaux réguliers. Le capitaine Scoresby, qui a séjourné long-temps dans les régions polaires, (Fig. 326.) y a particulièrement étudié cette cristallisation de la neige dont on voit ici quelques exemples. On remarquera que les angles d'assemblage sont presque exclusivement de 60 et de 120°.

Neige rouge. 1138. La neige rouge qu'on trouve dans certaines localités, particulièrement sur le mont Saint-Bernard, doit sa couleur à une plante cryptogame excessivement petite, à laquelle on a donné le nom d'*uredo nivealis*.

Grésil. 1139. Le *grésil* se compose de petites pelotes ordinairement coniques et beaucoup plus compactes que la neige; il paraît dû à une congélation brusque de la vapeur vésiculaire par son mélange avec un courant d'air très froid et animé d'une grande vitesse.

Grêle. 1140. La grêle, beaucoup plus dense que le grésil, résulte de la congélation de gouttes toutes formées.

Les grêlons présentent ordinairement des couches alternativement opaques et transparentes; leur surface est souvent hérissée de grains plus petits; on en a vu qui pesaient une demi-livre et même davantage. La grêle est liée aux orages; elle ne tombe guère qu'en été et pendant le jour, sa chute ne dure que quelques minutes sur le même point;

mais un nuage de grêle parcourt quelquefois une étendue de plus de 100 lieues avec une vitesse de 15 à 16 lieues à l'heure. Nous donnerons ici le résumé des observations faites dernièrement par M. Lecoq, professeur d'histoire naturelle, qui s'était placé sur le Puy-de-Dôme, à Clermont, au milieu même d'un nuage à grêle :

1° Il paraît que la grêle se forme pendant les vents d'impulsion et non pendant ceux d'aspiration ;

2° Deux couches de nuages superposés et deux vents contraires sont nécessaires pour produire la grêle;

3° Les grêlons ne vont pas d'un nuage à l'autre, comme le supposait Volta, ils sont au contraire animés d'une vitesse horizontale très grande et ils voyagent poussés par un vent très froid;

4° Selon toute apparence, le nuage supérieur est électrisé et soutient l'inférieur pendant sa marche;

5° Les grêlons ne se choquent pas pendant leur transport horizontal, et le roulement qu'on entend de si loin est dû à la réunion des bruits partiels produits par chaque grêlon qui traverse l'air avec vitesse; le choc de quelques grêlons, pendant leur trajet, les fait immédiatement tomber.

CHAPITRE VI.

CHALEUR SPÉCIFIQUE.

§ I. *Chaleur spécifique des solides et des liquides.*

1145. De même qu'on jauge les liquides sans se douter de leur composition chimique ; qu'on mesure le temps, les forces, la vitesse, etc., sans connaître leur nature, on peut évidemment mesurer la chaleur avant de savoir en quoi elle consiste. Tout se réduit à prendre pour unité une quan- Unité de chaleur.

tité de chaleur bien déterminée. L'unité adoptée généralement est *la chaleur nécessaire pour élever* 1ᵏ *d'eau de* 0 *à* 1°; on lui donne quelquefois le nom de *calorie*, de *therme*, etc.

Chaleur spécifique.

1142. On a longtemps cru qu'à poids égal les différentes substances contenaient la même quantité de chaleur quand la température était la même; mais Black, physicien du siècle dernier, démontra qu'il n'en était pas ainsi; on eut dès lors l'idée de *la chaleur spécifique*, qui est *la chaleur nécessaire pour faire varier d'un degré la température de chaque substance sous l'unité de poids.*

Elle est constante entre 0 et 100°. Vérification pour l'eau.

1143. Il est facile de s'assurer que la chaleur spécifique de l'eau est constante entre 0 et 100°, c'est-à-dire qu'entre ces limites, il faut toujours la même quantité de chaleur pour faire varier d'un degré la température d'un kilog. d'eau. En effet, si en supposant cette invariabilité nous calculons la température des mélanges d'eau chaude et d'eau froide, nous trouverons toujours un accord parfait entre les résultats de l'expérience et ceux du calcul. Prenons, par exemple, 1^k d'eau à 20°; dans notre hypothèse il contient, *à partir de zéro*, précisément 20 unités de chaleur; mêlons-le avec 1^k qui en contienne 40, c'est-à-dire qui soit à 40°, nous aurons en tout 60 unités, lesquelles réparties entre les 2^k, devront porter à 30° la température du mélange; et c'est aussi ce qui a lieu quand on tient compte, comme nous l'indiquerons par la suite, de la chaleur absorbée par le vase ou perdue par le rayonnement.

Vérification pour les autres substances.

1144. La chaleur spécifique des autres substances est également constante, c'est-à-dire que s'il faut un cinquième d'unité de chaleur pour porter 1^k de marbre de 0 à 1°, il en faudra une quantité pareille pour le porter de 1° à 2°, et ainsi de suite; cela se vérifie, comme nous le verrons, par le procédé même qui sert à mesurer la chaleur spécifique.

Remarque.

Il s'agit dans tout ceci du thermomètre à mercure; l'invariabilité des chaleurs spécifiques ne s'observerait pas si les degrés étaient comptés sur le thermomètre à alcool.

1145. On ne peut pas mesurer toute la chaleur que renferme un corps; mais on arrive à déterminer celle qu'il contient à partir de zéro jusqu'à une température donnée

soit au-dessous soit au-dessus. L'expression de cette quantité de chaleur est même extrêmement simple dans ce dernier cas, pourvu qu'on ne dépasse pas beaucoup 100°, parce que dans ces limites la chaleur spécifique est constante. On trouvera par exemple aisément qu'il y a 30 unités de chaleur dans 10 k de marbre à 12°, en admettant que la chaleur spécifique soit 0,25; car puisque par la supposition même il y a 0,25 d'unité dans 1k à 1° il y en aura 3 dans 1k à 12° et 10 fois autant ou 30 dans un poids 10 fois aussi grand. En généralisant on voit que c étant la chaleur spécifique, m la masse mesurée par le poids en kilogr. et t la température dans les limites où la chaleur spécifique est constante, on a $m\,c\,t$ pour la quantité de chaleur contenue à partir de zéro. Chaleur à partir de 0°.

1146. Cette expression donne une formule générale pour mesurer la chaleur spécifique par la méthode dite des mélanges. Mesure de la chaleur spécifique, par la méthode des mélanges.

Versons, par exemple, m^k d'eau à $t°$ dans un vase de verre à la température t' et pesant m'; les chaleurs spécifiques étant 1 pour l'eau et c' pour le verre, nous aurons $m\,t + m'\,c'\,t'$ pour la quantité de chaleur avant le mélange; après le mélange ce sera $m\theta + m'\,c'\,\theta$; en désignant par θ la température moyenne. Comme elle s'établit assez rapidement pour qu'il n'y ait pas de perte sensible, les deux quantités de chaleur seront égales, ce qui fournira l'équation

$$\text{(A)}\quad m\,t + m'\,c'\,t' = m\,\theta + m'\,c'\,\theta \text{ d'où } c' = \frac{m\,(t-\theta)}{m'(\theta-t')}$$

soit, $m = 1^k$, $t = 40°$, $m' = 0^k5$, $t = 10°$, $\theta = 37°5$; on tirera $c' = 0{,}18$; ainsi il faut 18 centièmes d'unité de chaleur pour élever d'un degré la température d'un kilog. de verre. Comme en variant les températures entre 0 et 100° on retombe toujours sur le même résultat, on a le droit de conclure que la chaleur spécifique du verre est constante entre ces limites.

Pour trouver la chaleur spécifique c'' d'une autre substance, on en versera un poids m'' à la température t'' dans

un vase de verre contenant de l'eau et on notera la température θ du mélange; alors l'équation des quantités de chaleur sera

$$(B) \qquad m\,t + m'c'\,t + m''c''\,t'' = m\,\theta + m'c'\,\theta + m''c''\,\theta$$

$$\text{d'où } c'' = \frac{(m + m'c')\,(t - \theta)}{m''\,(\theta - t'')}$$

Application au mercure. Si on fait l'expérience avec du mercure on trouvera $c' =$ 0,033, ce qu'on pourra d'ailleurs vérifier simplement en mêlant 1k de mercure à 0° avec 1k d'eau à 31°, on obtiendra un mélange à 30°; d'où l'on voit, en négligeant ce qui a rapport au vase, qu'une unité de chaleur suffit pour élever 1k de mercure de 0 à 30°, et que par conséquent sa chaleur spécifique ou la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1° est $\frac{1}{30}$.

Précautions à prendre. 1147. La méthode des mélanges exige plusieurs précautions : 1° Si la substance dont on veut déterminer la chaleur spécifique a une action chimique sur l'eau, il faut l'enfermer dans un petit vase métallique offrant la plus grande surface possible et fermant hermétiquement, afin qu'on puisse le plonger en totalité; 2° le vase contenant l'eau doit aussi être généralement en métal et très mince, afin qu'il soit toujours exactement à la température de l'eau qu'il contient; 3° il faut qu'il pose seulement par trois pointes pour qu'il y ait le moins possible de chaleur transmise; 4° les corps solides dont on voudra déterminer la chaleur spécifique devront avoir une grande surface, afin que l'équilibre de température s'établisse plus promptement; 5° ainsi il est avantageux de leur donner la forme d'anneaux plats. Il faut opérer de manière que la température du mélange diffère peu de celle de l'appartement pour éviter de perdre ou de recevoir de la chaleur; 6° le procédé pour élever à une température bien déterminée les corps sur lesquels on veut opérer consiste à les tenir quelque temps dans l'eau bouillante; on peut en général négliger la petite couche qui adhère à leur surface; 7° enfin on doit tenir compte de la chaleur pendant l'expérience, s'il faut 8 à 10 minutes, par exemple, pour que l'équilibre s'établisse.

1148. *Chaleur spécifique des solides et des liquides entre* 0 *et* 100°

Eau	1
Acide nitrique $d = 1,3$	0,66
Alcool $d = 0,793$	0,622
Acide hydrochlorique $d = 1,53$	0,6
Éther sulfurique $d = 0,715$	0,52
Bois, environ	0,5
Essence de térébenthine $d = 0,872$	0,472
Phosphore	0,385
Acide sulfurique $d = 1,84$	0,33
Huile d'olive	0,31
Nitrate de potasse	0,269
Carbone	0,257
Sel marin	0,221
Carbonate de chaux	0,2
Alumine anhydre	0,2
Peroxide de manganèse	0,191
Soufre	0,188
Chaux anhydre	0,1793
Silice (quartz)	0,179
Verre	0,177
Fer	0,11
Cuivre	0,0949
Zinc	0,0927
Iode	0,089
Arsenic	0,081
Argent	0,0557
Étain	0,0514
Mercure	0,033
Platine	0,0314
Or	0,0298
Plomb	0,0293

1149. On voit que s'il faut une unité de chaleur pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau, il en faut en général beaucoup moins pour les autres sub- Applications. Chaleur remarquable de l'eau.

stances. La chaleur contenue dans 1^k d'eau bouillante suffirait pour élever à la même température environ 3^k d'acide sulfurique, 9 de fer, 34 de mercure, de platine, d'or ou de plomb ; 1^k d'eau à 100° contient 100 unités de chaleur : il n'y en a pas 70 dans 1^k de fer chauffé au rouge, c'est-à-dire porté à 5 ou 600°, et pas même 60 dans le même poids d'argent sur le point de se fondre. Aussi l'eau est-elle d'un emploi continuel pour absorber la chaleur, comme on le voit dans la trempe, dans les bains froids, les affusions après les brûlures, etc.

— des liquides en général. Feible chaleur des métaux les plus denses.

Il est à remarquer que les liquides exigent en général plus de chaleur que les solides pour s'échauffer autant ; mais cela tient à leur composition, et non à la liquidité, puisque le mercure, quoique liquide a une très petite chaleur spécifique. Les métaux sont de tous les corps ceux dont la température change avec le moins de chaleur possible, et parmi eux ce sont en général les plus denses qui, à température égale, contiennent le moins de chaleur.

Vitesse d'échauffement et de refroidissement.

1150. Il est évident que, toutes choses égales, les changements de température seront plus rapides dans les substances qui ont une petite chaleur spécifique ; que le cuivre, par exemple, s'échauffera et se refroidira plus vite que l'or. Mais pour les métaux ces différences sont peu sensibles. Il n'en est pas de même de l'eau ; sa lenteur à s'échauffer est remarquable ; ainsi de l'huile mise devant le feu sera déjà à 100° quand l'eau ne sera pas même à 50. Il doit s'écouler une longue suite de jours chauds, pour que les rivières prennent la température de l'été ; mais aussi une nuit ne suffit pas pour les refroidir, comme cela arrive pour le sol. Au lever du soleil, quand l'air est le plus froid possible, on trouve encore l'eau sensiblement aussi chaude que la veille.

Questions relatives à la température des mélanges.

1151. La table des chaleurs spécifiques donne le moyen de résoudre diverses questions sur la température des mélanges, quand il n'y a pas d'action chimique ; nous en indiquerons quelques-unes :

1° On mêle 10^k d'eau à 30° avec 25^k d'eau à 60° ; on demande la température du mélange. Si nous négligeons la chaleur absorbée par le vase et perdue pendant l'opéra-

tion, l'équation des quantités de chaleur (A) (1146) devient simplement

$$10 \times 30 + 25 \times 6 = (10 + 25)\,\theta, \text{ d'où } \theta = 12°,8;$$

2° Quelles quantités d'eau à 100° et à 10° faut-il mêler pour former 200^k à 30°? Soit *m* le poids de l'eau à 100°, on a

$$100m \times 10\,(200 - m) = 200 \times 30, \text{ d'où } m = 44^k\tfrac{4}{9};$$

3° Quelle température prendront $0^k,2$ d'eau à 60° si on les verse dans un vase de porcelaine à 10° pesant $0^k,4$? En supposant à la porcelaine la même chaleur spécifique qu'à la silice et à l'alumine, c'est-à-dire 0,2, l'équation (A) donne $\theta = 24°$.

4° Quand on plonge un thermomètre dans une petite masse d'eau, on a en général une indication erronée puisque l'instrument absorbe de la chaleur; mais on peut obtenir la véritable température en tirant *t* d'une équation analogue à (B) (1146), avec un terme de plus pour avoir égard à la fois au mercure et au verre du thermomètre dont les poids sont supposés connus.

1152. Il faut observer que le chiffre qui représente la chaleur spécifique du fer, par exemple, représente aussi le poids de l'eau, qui exigerait la même quantité de chaleur qu'un kilogramme de fer, pour varier d'un degré. Par exemple, 1^k de fer à 1° contient 0,11 d'unité de chaleur et $0^k,11$ d'eau également à 1° en contiennent la même quantité. On voit d'après cela que l'équivalent de 3^k de fer, sous le rapport de la chaleur, sera $0^k,33$ d'eau, et qu'en général, si on appelle *m* le poids d'un corps et *c* sa chaleur spécifique, *mc* sera *l'équivalent en eau*, c'est-dire le poids de l'eau capable d'absorber ou de rendre la même chaleur. Si, par exemple, une chaudière en fer pèse 100^k, elle absorbera autant de chaleur que 11^k d'eau, pour s'élever à la même température. Equivalents en eau.

1153. MM. Dulong et Petit ont reconnu qu'il fallait la même quantité de chaleur pour faire varier d'un degré la température des atomes des corps simples solides. Soit *p* Chaleur des atomes. Loi de Dulong.

le poids inconnu de l'atome d'oxigène : par diverses considérations on arrive, en chimie, à connaître les poids relatifs des autres atomes ; par exemple, on a

2,01 p pour le poids de l'atome de soufre ;
3,39 p pour le poids de l'atome de fer ;
etc.

Or 2,01 p étant un certain poids en kilogr., si on le multiplie par 0,188 chaleur spécifique du soufre, on aura la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température de l'atome de soufre; on trouve ainsi 0,378 p. Pour le fer 0,373 p, pour le plomb 0,379 p, et en général des nombres si voisins qu'on peut attribuer leurs différences aux erreurs inévitables dans les expériences.

Il paraît, d'après les recherches de MM. Avogrado et Neuman, que l'égalité de chaleur des atomes a lieu dans d'autres classes de corps, quoique la quantité varie d'une classe à l'autre. Le fait est certain pour les gaz simples d'après les recherches mêmes de M. Dulong.

Chaleur spécifique au-dessous de 0°.

1154. La chaleur spécifique est moindre dans les basses températures ; cependant pour de certaines limites, et surtout quand il n'y a pas de changement d'état, on peut admettre au-dessous de 0° les nombres trouvés au-dessus.

Chaleur spécifique de la glace.

1155. La chaleur spécifique de la glace est sensiblement moindre que celle de l'eau, c'est-à-dire qu'il faut moins de chaleur pour élever un morceau de glace de — 10° à — 9°, que pour faire varier d'un degré la température de l'eau qui en résulte. On peut mesurer la chaleur spécifique de la glace par la méthode des mélanges, en remplaçant l'eau par l'alcool refroidi à 10°, et en y plongeant un vase fermé rempli de glace à — 20° par exemple. Soit M le poids de l'alcool, C sa chaleur spécifique, T le nombre de degrés dont sa température s'est abaissée, MCT sera la chaleur cédée à la glace. Soit M' le poids de la glace, C' sa chaleur spécifique, T' le nombre de degrés dont sa température s'est élevée, M'C'T' sera la chaleur reçue ; l'équation MCT = M'C'T' donnera C', qu'on a trouvé ainsi égal à 0,92. Un autre mode d'expérience a donné 0,72;

ainsi tout ce qu'on peut affirmer, c'est que la chaleur spécifique de la glace est d'un dixième environ plus petite que celle de l'eau.

Chaleur spécifique au-dessus de 100°.

1156. Les expériences de MM. Dulong et Petit ont montré que la chaleur spécifique croissait avec la température, c'est-à-dire qu'il fallait moins de chaleur pour porter un corps de 0, à 100°, que de 100 à 200°, et à plus forte raison de 200 à 300°. Ils opéraient par la méthode des mélanges; les substances qu'on devait plonger dans l'eau froide étaient échauffées dans un bain d'huile. Voici les résultats de leurs expériences :

	Chaleur spécifique moyenne	
	Entre 0 et 100°	Entre 0 et 300°
Verre.	0,177	0,190
Cuivre.	0,0940	0,1013
Zinc.	0,0927	0,1015
Argent.	0,0557	0,0611
Antimoine.	0,0507	0,0547
Platine.	0,0335	0,0355
Mercure.	0,033	0,035

Pour le fer,	**entre 0 et 100°**	0,1098
	0 et 200	0,1150
	0 et 300	0,1218
	0 et 350	0,1255

Mesure des hautes températures par la méthode des mélanges.

1157. Quand on mesure une très haute température par la méthode des mélanges, on doit avoir égard à l'accroissement de la chaleur spécifique, ce qui peut se faire approximativement. Admettons, par exemple, que de 0° à la chaleur rouge la chaleur spécifique du fer soit de 0,15, et supposons qu'une masse de fer de 1 k chauffée dans un fourneau dont on veut connaître la température ait produit une élévation de 18° dans une masse d'eau de 10k. Il s'ensuit que le fer a donné 180 unités de chaleur; comme il lui faut 0,15 d'unité pour varier d'un degré, on aura évidemment l'abaissement qu'il a éprouvé en cherchant combien de fois 0,15 est contenu dans 180. On trouve ainsi 1200°, de sorte que si l'eau est actuellement à 30°, la température du fourneau

peut être évalué à 1230°; l'équation (A) (1146) indique la marche à suivre pour le calcul en général. En faisant deux expériences sur des masses différentes, on aurait deux expressions de la même température entre lesquelles on pourrait éliminer la chaleur spécifique inconnue qui se trouverait même ainsi déterminée; mais il faudrait tenir compte de la perte considérable de chaleur entraînée par la vaporisation de l'eau (1201).

§ II. *Chaleur spécifique des gaz et des vapeurs.*

Appareil pour mesurer la chaleur spécifique des gaz (à force constante).

1158. Pour mesurer la chaleur spécifique des gaz, on fait passer très lentement un courant de gaz chaud à travers un poids connu d'eau froide; par la disposition de l'expérience on arrive au même résultat que s'il s'établissait une température moyenne par le mélange d'un corps chaud avec un corps froid, de sorte qu'on rentre dans la méthode des mélanges. On a une idée de l'appareil, en imaginant qu'un gazomètre fait avec le vase de Mariotte (579) donne un courant uniforme de gaz, qui après s'être desséché dans un tube A de chlorure de calcium, traverse un autre tube B où arrive continuellement de la vapeur d'eau bouillante. Le gaz ainsi échauffé parcourt un serpentin S plongé dans de l'eau froide. Un écran E préserve le serpentin de l'échauffement; le tube *b* donne issue à la vapeur liquéfiée. Avec des thermomètres on mesure la température du gaz à l'entrée et à la sortie.

Fig. 331.

Application à l'air.

1159. Dans une expérience relative à l'air il y avait $0^k,580$ d'eau dans le serpentin. Celui-ci était en cuivre, et pesait tout entier $0^k 4$; il équivalait donc à $0^k,038$ d'eau (1152) et les choses se passaient comme si on avait eu $0^k,618$ de ce liquide. L'air employé jaugé d'après son volume pesait $0^k,109$; il traversait le serpentin assez lentement pour donner toute sa chaleur à l'eau, de manière qu'il avait en sortant la même température qu'elle, 8° d'abord, puis 12° à la fin. Le gaz entrait à 95°, le refroidissement à ces deux instants était donc de 87° et de 83°; mais comme dans l'intervalle il se faisait uniformément, on peut

supposer qu'il a été de 85° pendant toute l'expérience. D'après cela, si on désigne par c la chaleur nécessaire pour faire varier 1^k d'air de 1°, on aura $c \times 85 \times 0{,}109$ pour la chaleur donnée; la chaleur reçue est $4 \times 0{,}618$; ces deux quantités sont égales : donc $c = 0{,}267$, c'est-à-dire que la chaleur spécifique de l'air est à peu près le quart de celle de l'eau.

1160. Nous avons dit que les choses se passaient comme si le refroidissement du gaz avait été de 85° pendant toute l'expérience; en effet, soit m le poids du gaz sortant du serpentin pendant la première seconde, a son abaissement de température, qu'on peut supposer de 87°, c sa chaleur spécifique; mac sera la chaleur donnée à l'eau par cette portion de gaz. Pour la deuxième seconde on aura $m\,a'\,c$, pour la 3° $m\,a''\,c$, etc., m ne changeant pas sensiblement, puisque le courant est uniforme et le changement de volume toujours à peu près le même. Dès lors la totalité de la chaleur abandonnée par le gaz est $m\,c\,(a + a' + a''..)$. Mais dire que le refroidissement est uniforme, c'est dire qu'à chaque seconde il y a une même fraction de degré de différence dans l'abaissement; les quantités $a\ a'\ a''$ etc., forment donc une progression arithmétique dont la somme est $\left(\frac{87+83}{2}\right) n = 85\,n$ en désignant par n le nombre des termes, c'est-à-dire le nombre de secondes qu'a duré l'expérience. Mais il est évident que $m\,n$ est la masse entière du gaz ou $0^k{,}109$; donc la chaleur donnée à l'eau est bien $c \times 85 \times 0{,}109$, comme nous l'avions supposé.

On a le droit de supposer à l'air une température constante.

1161. Les expériences de ce genre durent environ 10'; mais par la méthode de compensation due à Rumford on n'a pas à tenir compte de la perte de chaleur. Après avoir déterminé par un essai préalable les températures extrêmes du serpentin, on opère à une température moyenne. Dans le cas précédent on s'était arrangé pour que l'air de l'appartement fût à 10°; de cette manière le serpentin d'abord à 8° recevait pendant les 5 premières minutes précisément autant de chaleur qu'il en recevait pendant les 5 dernières. Cela résulte de la loi de Newton, comme nous le verrons bientôt et d'un raisonnement analogue au précédent.

Méthode de compensations pour éviter la perte de chaleur.

Résultats pour les gaz autres que l'air.

1162. Nous avons pris l'air comme exemple; mais on opère de même pour les autres gaz. Plus loin nous donnerons leurs chaleurs spécifiques résultant des expériences de M. Dulong (1168) : nous dirons seulement ici que les gaz les moins denses sont ceux qui en général absorbent le plus de chaleur. Pour les gaz simples en particulier, ou les mélanges de gaz simples, il y a cette loi remarquable que la chaleur spécifique est proportionnelle au volume ; nous supposons toujours le poids égal et la pression constante. Ainsi l'hydrogène, qui occupe un volume 16 fois aussi grand que l'oxigène, exige une chaleur 16 fois aussi grande pour prendre la même température ; c'est du reste de tous les corps connus celui qui absorbe le plus de chaleur à poids égal; 1_k d'hydrogène pour varier de $1°$ demande près de 4 unités de chaleur.

Chaleur spécifique d'un litre de gaz.

1163. Ayant la chaleur spécifique d'un kilog. d'air, il est facile de calculer celle d'un litre ; car s'il s'agit d'air à $0°$ sous $0^m,76$, on aura 770^l dans 1^k, et par conséquent il n'y a qu'à diviser 0,267 par 770. On trouve ainsi que $\frac{1}{2885}$ d'unité de chaleur suffit pour faire varier de $1°$ la température d'un litre ; de sorte qu'à volume égal et à la même température, l'air contient 2885 fois autant de chaleur que l'eau. Cela fait concevoir comment certains hommes peuvent rester quelques instants dans des étuves ou des fours chauffés à près de $100°$. On voit que c'est tout autre chose que de se plonger dans l'eau bouillante, quoique la température soit la même.

A volume égal les gaz simples ont la même chaleur spécifique.

1164. En calculant la chaleur spécifique d'un litre pour les autres gaz, comme nous venons de le faire pour l'air, on trouverait qu'elle est plus grande en général dans ceux qui sont plus denses. Quant aux gaz simples, il est évident qu'ils ont la même chaleur spécifique à volume égal, car nous savons, par exemple, qu'il y a 16 fois autant de chaleur dans 16 litres d'hydrogène que dans 1^l d'oxigène, quoique les poids soient égaux (1162).

Influence de la densité.

1165. En mesurant la chaleur spécifique de l'air condensé avec un appareil qui différait du précédent seulement en ce que la pression atmosphérique y était aug-

mentée, MM. Delaroche et Bérard ont reconnu que la chaleur nécessaire pour élever de 1° la température d'un litre de gaz était plus grande quand le gaz était plus dense, mais sans être cependant tout-à-fait double quand la densité était doublée. Il en résulte qu'une même quantité de chaleur produit sur un poids déterminé de gaz une moins grande élévation de température, s'il est dilaté, que s'il est condensé, c'est-à-dire que la chaleur spécifique à poids égal diminue quand la densité augmente.

1166. Par la disposition de l'appareil dont nous nous sommes servis, le gaz peut se dilater à mesure qu'il s'échauffe, et comme il fait toujours équilibre à la pression atmosphérique qui ne change pas pendant l'expérience, on voit que la chaleur spécifique que nous avons mesurée est celle d'un gaz qui conserve la même force élastique. Nous allons maintenant considérer le cas d'un gaz enfermé de manière à ne pas pouvoir se dilater. Il est certain d'abord que la chaleur nécessaire pour faire varier de 1° sa température est moindre dans ce dernier cas que dans l'autre. Cela résulte de ce que les gaz, ainsi que nous le verrons, se refroidissent en se dilatant (1174). En admettant ce principe, on voit bien qu'un litre d'air pris à 0°, et dont nous aurions porté la température à 1° sans lui permettre de changer de volume, n'aurait plus assez de chaleur pour rester à 1° dès qu'il viendrait à se dilater en vertu de son accroissement de force élastique.

Distinction entre les chaleurs spécifiques à force constante et à volume constant.

Celle-ci est moindre.

1167. Il n'y a pas de procédé bien exact pour mesurer directement la chaleur spécifique des gaz à volume constant, mais on en obtient indirectement une mesure très précise à l'aide d'une relation due à Laplace, et dont M. Dulong a le premier tiré parti. Si pour un même gaz on désigne par C et c les chaleurs spécifiques à force constante et à volume constant; par V et v les vitesses du son dans ce même gaz, l'une réelle, l'autre calculée par la formule de Newton (805) qui la donne toujours plus petite, on a la proportion

Moyen de la mesurer.

$$C : c :: V^2 : v^2$$

Pour l'air à 0° sous $0^m,76$, $V = 333^m$; $v = 279^m$;

$C=0,267$: donc $c=0,188$. Ainsi, pour élever de 1° la température de 1^k d'air, il ne faut pas $\frac{1}{5}$ d'unité de chaleur s'il n'y a pas de dilatation, tandis qu'il en faut plus de $\frac{1}{4}$ lorsque l'air se dilate de manière à conserver la même force élastique.

Les gaz simples ont la même chaleur spécifique à volume constant.

1168. Ayant déterminé la vitesse du son dans les autres gaz (776), M. Dulong a pu calculer leur chaleur spécifique à volume constant, en multipliant celle à force constante par le rapport $\frac{V^2}{v^2}$; il a trouvé aussi qu'elle était encore la même pour les gaz simples (1165). Quant aux gaz composés, voici les résultats obtenus en prenant pour unité la chaleur spécifique de l'air à volume constant :

Chaleur spécifique des gaz composés à volume constant.

Oxide de carbone	1,
Protonide d'azote	1,227
Acide carbonique	1,249
Hydrogène bicarboné	1,754

La différence entre les deux chaleurs spécifiques est la même pour tous les gaz.

1169. En calculant par rapport à la même unité les chaleurs spécifiques à force constante, M. Dulong a reconnu qu'elles ne différaient des précédentes que par l'addition du nombre constant 0,421, et que cette loi se vérifiait pour les gaz composés comme pour les gaz simples. Ainsi, pour l'air, on a 1,421, pour le protoxide d'azote, 1,648, etc.

Loi d'Avogrado.

1170. M. Avogrado a trouvé qu'en prenant toujours pour unité la chaleur spécifique d'un gaz simple à volume constant, celle des gaz composés était égale à la racine carrées des nombres d'atomes simples formant l'atome composé ; en effet, les résultats ainsi obtenus diffèrent peu de ceux consignés dans le tableau précéden t.

Ozide de carb. $=\frac{1}{2}$ Oxig. $+\frac{1}{2}$ Carb. .... $\sqrt{\frac{1}{2}\times\frac{1}{2}}=1$

Prot. d'az. $=1$ Az $\times\frac{1}{2}$ Oxig .... $\sqrt{1+\frac{1}{2}}=1,225$

Acide carb. $=1$ Oxig. $+\frac{1}{2}$ Carb ...... $\sqrt{1+\frac{1}{2}}=1,225$

Hydr. bicarb. $=2$ Hydr. $+1$ Carb ... $\sqrt{2+1}=1,732$.

Le rapport

1171. Nous savons que la vitesse réelle du son reste

la même dans un gaz dense ou raréfié (654); d'un autre côté, la vitesse calculée par la formule de Newton ne dépend pas de la densité non plus; par conséquent on peut affirmer que le rapport C : *c* des deux chaleurs spécifiques d'un gaz ne change pas quand on change la densité (1167).

Des chaleurs spécifiques d'un gaz est indépendant de la pression.

1172. On a fait peu d'expériences sur la chaleur spécifique des vapeurs. Pour la vapeur d'eau, M. Dulong adopte provisoirement $\frac{1}{2}$ quand la pression est constante, et $\frac{1}{3}$ quand le volume est constant. La chaleur spécifique de l'eau liquide est ici prise pour unité, et la vapeur est supposée avoir la densité que lui donnerait le calcul a 0° sous 0m,76. En calculant les chaleurs spécifiques par la loi d'Avogrado, on tombe sur 0,5 et 0,37.

Chaleur spécifique de la vapeur d'eau à force constante et à volume constant.

CHAPITRE VII.

CHALEUR LATENTE.

---

§ I. *Chaleur absorbée par la dilatation et dégagée par la compression.*

1173. En général, quand une substance augmente de volume, soit par une simple dilatation, soit surtout par un changement d'état, il disparaît une quantité de chaleur souvent très considérable; au contraire, il se produit de la chaleur quand les changements de volume ou d'état ont lieu en sens inverse; on admet même en principe que la chaleur qui reparaît est précisément égale à celle qui avait disparu, à laquelle d'après cela on donne le nom de chaleur *latente*. Quoique ce principe soit fondé plutôt sur des vues théoriques que sur des expériences directes, il s'accorde assez bien avec les faits connus pour qu'on puisse le regarder comme vérifié.

Phénomène de la chaleur latente.

Principe général.

1174. Nous examinerons d'abord le phénomène de la

Froid pro-

duit par dilatation des gaz. chaleur latente dans les changements de volume des gaz. Si on établit le thermomètre de Bréguet (894) sous le récipient de la machine pneumatique, et qu'on donne brusquement deux ou trois coups de piston, on voit que la raréfaction de l'air produit un refroidissement considérable, comme de 20 ou 30°. Ce froid ne dure pas, parce que les parois du récipient réchauffent l'air presque aussitôt; voilà même pourquoi on ne peut pas se servir du thermomètre à mercure, qui aurait à peine le temps de descendre de 1 ou 2°.

Chaleur produite par la compression. 1175. Quand l'équilibre de température est rétabli et qu'on laisse rentrer l'air brusquement, il y a un dégagement de chaleur qui fait marcher l'aiguille de 20 ou 30° en sens inverse, de sorte que si l'air pouvait ne rien recevoir des corps environnants dans le premier cas, la compression lui rendrait certainement toute la chaleur que la raréfaction lui fait perdre.

Applications. Froid des hautes régions. 1176. Nous indiquerons quelques phénomènes remarquables qui résultent du froid et de la chaleur que produisent les changements de volume des gaz. Nous savons qu'il règne un très grand froid dans les hautes régions (877); cela tient surtout à ce que l'air ne s'échauffe que par son contact avec les corps solides ou liquides, et non par les rayons qui le traversent, se refroidit à mesure qu'il se dilate en montant. Une masse d'air à 20° tomberait tout à coup à 44°, si on la transportait à une hauteur telle que son volume fût doublé (1186). Cette dilatation aurait lieu à 6000^{m} environ; or, puisqu'à cette hauteur la température est — 8° à peu près, il faut que l'air ait emprunté aux couches inférieures ainsi qu'aux flancs des montagnes assez de chaleur pour relever sa température de 36°. Sans doute il faut peu de chaleur pour élever de 1° un volume d'air considérable, mais les corps qui peuvent l'échauffer deviennent plus rares à mesure qu'on s'élève; elles doivent donc être plus refroidies : aussi les pics isolés qui pointent dans les hautes régions sont-ils immédiatement dépouillés de la chaleur qu'ils reçoivent du soleil par la couche immense d'air qui se trouve à leur niveau.

1177. Dans certaines mines il s'échappe par des fissures des jets d'air tellement froids, que les corps qu'on leur présente se couvrent en quelques instants d'une couche de neige. On produit le même phénomène en laissant échapper du chalumeau à gaz (561) de l'air comprimé à 2 ou 3 atmosphères et saturé d'humidité : une petite boule de verre qu'on expose dans le jet se couvre de glace ; le froid vient évidemment alors de la dilatation qu'éprouve le gaz en pénétrant dans l'atmosphère ; mais il est remarquable que ce froid puisse aller jusqu'à congeler la vapeur d'eau. La chaleur absorbée par la dilatation explique encore pourquoi la vapeur qui s'échappe par la soupape d'une chaudière à haute pression est à peine tiède à quelque distance de l'ouverture, tandis qu'à la même distance un jet de vapeur à basse pression est encore brûlant.

Neige artificielle.

Refroidissement de la vapeur.

1178. Quand on comprime assez vivement un gaz pour que la chaleur produite n'ait pas le temps de se perdre dans les corps environnants, on obtient facilement des élévations de température de 4 à 500°. C'est là-dessus qu'est fondé le briquet à air, espèce de tube en verre ou en cuivre, dans lequel on comprime l'air brusquement avec un piston portant un peu d'amadou qui s'allume ainsi ; et même sans amadou, il se produit souvent de la lumière, qui, comme M. Thénard l'a prouvé, est due à l'inflammation des corps gras qui garnissent le piston.

Briquet à air.

1179. Il est évident que les gaz ne suivent plus la loi de Mariotte, quand on les comprime ou qu'on les dilate brusquement. Dans le premier cas, la chaleur dégagée fait que leur force élastique est plus grande que ne le suppose la loi; dans l'autre cas, c'est le contraire. Dans les appareils ordinaires, le gaz revient si vite à sa température primitive, qu'on ne s'aperçoit guère des différences; mais l'accroissement d'élasticité devient sensible dans les alternatives de condensation et de dilatation qui constituent le son, dont la vitesse se trouve à cause de cela d'un sixième environ plus grande que ne l'indique la formule de Newton fondée tout simplement sur la loi de Mariotte (803).

Loi de Mariotte en défaut.

1180. Les changements de température que présentent

De quoi dé-

pendent les changements de température dans les changements de volume des gaz. les gaz, pendant leurs changements de volume, résultent de ce que leur chaleur spécifique devient de plus en plus grande, à mesure qu'ils se raréfient; de sorte que la chaleur contenue dans une masse déterminée d'air dilaté se trouve, dès qu'il y a compression, plus que suffisante pour maintenir la température au même point. Nous verrons d'ailleurs que la différence des chaleurs spécifiques suffit pour rendre compte des hautes températures qu'on peut obtenir.

Mesure de la chaleur produite dans un cas particulier. 1181. Pour mesurer la chaleur dégagée par la compression, considérons d'abord un litre d'air à 0° sous $0^m,76$; il lui faut, comme nous savons, $\frac{1}{2868}$ d'unité de chaleur pour s'élever de 1° en se dilatant de $\frac{1}{267}$, cas auquel il conserve la même force élastique. Mais $\frac{1}{4100}$ lui aurait suffi, si son volume n'eût pas changé (1167). Donc, si par la compression on ramène l'air à son volume primitif, il y aura un excès de chaleur égal à $\frac{1}{2868} - \frac{1}{4100}$, en vertu duquel la température s'élèvera d'autant de degrés que cette chaleur contient de fois $\frac{1}{4100}$, c'est-à-dire de $0°,421$.

Élévation de température qui en résulte.

La chaleur dégagée est la même pour tous les gaz. 1182. Puisque la chaleur dégagée par la compression est la différence $C - c$ des deux chaleurs spécifiques, il est clair qu'elle est la même pour tous les gaz (1169), d'après la loi de Dulong. Quant à la température qui en résulte, elle a pour expression $\frac{0°,421}{c}$, c'est-à-dire qu'elle est une raison inverse de la chaleur spécifique à volume constant; pour l'hydrogène bicarboné, elle serait seulement $0°,296$.

L'élévation de température est différente. Sa mesure.

Accroissement d'élasticité par une compression de $\frac{1}{267}$ 1183. On calcule aisément l'accroissement réel d'élasticité qui résulte d'une compression brusque de $\frac{1}{267}$; pour l'air, par exemple, l'élasticité augmente comme si la température était portée de 0°, à $1°,421$, ce qui donne $\frac{1,421}{267}$ pour l'accroissement (940).

Pour une compression quelconque. 1184. Dans tout ce qui précède nous n'avons considéré qu'un cas très particulier, celui où le gaz est comprimé de $\frac{1}{267}$ de son volume à zéro; de plus nous avons supposé sa température de 1° et sa force élastique de $0^m,76$; mais au moyen de deux formules dues à Laplace, on peut calculer

approximativement l'élasticité et la température d'un gaz quelconque comprimé d'une quantité quelconque. Soient f, f', d, d' les forces élastiques et les densités avant et après la compression, on a

$$\frac{f}{f'} = \left(\frac{d}{d'}\right)^k \qquad (A)$$

k étant le rapport entre les chaleurs spécifiques à force constante et à volume constant pour le gaz que l'on considère; pour les gaz simples $k = 1,421$.

1185. Soient maintenant t et t' les températures avant et après la compression, on aura — Élévation de température par une pression quelconque.

$$t' = (267 + t)\left(\frac{d'}{d}\right)^{k-1} - 267 \qquad (B)$$

Si, par exemple on prend de l'air à 0° et qu'on réduise son volume au 5°, on a

$$t' = 267\,[\,(5)^{0,421} - 1\,] = 267 \times 0,97 = 259°;$$

Si t n'est pas nul, il vient

$$t' - t = 259° + 0,97\,t,$$

d'où l'on conclut que l'accroissement de température dépend de la température initiale, et qu'il augmente avec elle; pour $t = 20°$ on aurait $t' = 298°$ et non pas seulement 279. Il suffit à la rigueur de réduire à l'air au 5° pour enflammer l'amadou.

1186. La formule (B) donne aussi la température, qui résulte d'une dilatation quelconque. Quelle température, par exemple, prendrait une masse d'air à 20°, si on doublait son volume ? On a — Refroidissement pour une dilatation quelconque.

log. $(267 + t') =$ log. 287 — 0,421 log. 2 = log. 214,3
d'où $t' = -43°,7$.

§ II. *Chaleur absorbée par la fusion et dégagée par la solidification.*

1187. Le rôle de la chaleur latente, dans les change- — Chaleur latente pendant

ments de volume des solides et des liquides, est peu marqué, et surtout trop peu connu pour que nous en parlions ici. Nous nous occuperons donc maintenant de la chaleur qui disparaît pendant les changements d'état.

les changements d'état.

Chaleur nécessaire à la fusion de la glace.

1188. Nous savons déjà (967) que les corps pour se fondre absorbent une quantité de chaleur très considérable, qui ne produit aucune élévation de température. Il nous reste à voir comment on mesure cette chaleur de fusion. Imaginons un bloc de glace contenant une cavité A, qu'on peut fermer exactement par un épais couvercle de glace. Ce bloc, mis dans une chambre où il ne gèle pas, atteint d'abord la température de 0°, puis la fusion commence. Or, si on essuie la cavité, et si le couvercle joint exactement, on verra que la glace ne fond qu'à l'extérieur du bloc, et on ne trouvera pas au bout de plusieurs heures une seule goutte de liquide en A. Ainsi arrivée à 0°, la glace ne transmet plus la chaleur; toute celle qu'elle reçoit est employée à la fondre couche par couche. Cette propriété étant bien constatée, versons en A 1^k d'eau à 75° du thermomètre centig. à mercure; au bout de 2 ou 3^h nous trouverons 2^k d'eau à 0°, et rien de plus, quelque temps que nous attendions encore. Nous conclurons de là que 1^k de glace à 0° demande 75 unités de chaleur pour se fondre sans changer de température (1141).

Fig. 834.

A la rigueur on pourrait décomposer les 75 unités de chaleur en deux parties, dont l'une serait pour la fusion proprement dite, et l'autre pour compenser la différence de chaleur spécifique de la glace et de l'eau.

Applications. Mesure de la chaleur en général.

1189. Un des meilleurs moyens de mesurer une quantité donnée de chaleur consiste à déterminer le poids de la glace que cette chaleur peut fondre. Pour faire les calculs il suffit de se rappeler que la fusion de $\frac{1^k}{75}$ répond à une unité de chaleur.

Mesure de la chaleur spécifique par le calorimètre de glace.

1190. Le vase de glace dont nous venons de nous servir a été employé pour mesurer les chaleurs spécifiques; il est même connu, à cause de cet usage, sous le nom de *calorimètre de glace*. Si nous voulons, par exemple, mesurer

la chaleur spécifique du fer, nous en prendrons un poids connu, 5^k je suppose, et, après avoir porté sa température à 100°, nous l'enfermerons dans le calorimètre. Ayant recueilli avec soin l'eau provenant de la glace fondue, nous trouverons que son poids s'élève à $0^k,733$ ce qui répond à $75 \times 0,733$ ou 55 unités de chaleur à très peu près. Un seul kilog. de fer n'en eût donné que 11, et seulement 0,11 si la température n'eût baissé que de 1°; donc 0,11 est la chaleur spécifique du fer. On voit qu'en représentant par m' le poids de la glace fondue, par m le poids de la substance que l'on considère, par t la température, et par c la chaleur spécifique, on a

$$c = \frac{75\,m'}{mt}.$$

Calorimètre de Lavoisier et Laplace.

1191. Le calorimètre de Lavoisier et Laplace n'est pas autre chose que le calorimètre de glace imité aussi parfaitement que possible avec de la glace pilée, qu'on entasse dans un vase en fer-blanc à compartiments contenus les uns dans les autres. La couche intérieure, préservée par l'autre, ne fond que par la chaleur du corps sur lequel on opère. La double enveloppe qui la contient se terminant en entonnoir, on peut à l'aide d'un robinet laisser l'eau s'écouler à la fin de l'expérience; mais il est difficile de tout recueillir, à cause de ce qui reste pour mouiller la glace. Les expériences durent de 15 à 20 heures; pour les accélérer, on met un peu de glace bien égouttée sur le corps chaud dans la cavité intérieure. Quand la substance a une action chimique sur l'eau, on la met dans un vase et on tient compte de la glace fondue par le vase, soit au moyen d'une expérience préalable, soit par l'équation (1190) qui donne $m' = \frac{mct}{75}$ Si, par exemple, on s'est servi d'un flacon de verre chauffé à 100° et pesant $0^k,1$, comme $c = 0,177$ on a $m' = 0^k,023$, à un gramme près.

Manière d'opérer.

Questions sur les mélanges d'eau et de glace.

1192. Quand on connait la chaleur nécessaire pour fondre la glace, il est facile de calculer la température des mé-

langes de glace et d'eau. On peut considérer 1^k de glace, de glace à o° comme ayant une chaleur négative de 75 unités ; on rentre ainsi dans le cas des mélanges d'eau chaude et d'eau froide (1151), et on a la formule :

$$mt - 75\,m' = (m + m')\,\theta$$

m est le poids de l'eau, t sa température, m' le poids de la glace, et θ la température du mélange ; nous examinerons 3 cas.

1° Si $m\,t > 75\,m'$, toute la glace se fond ; il reste un excédant de chaleur, et θ donne la température du mélange. Par exemple, avec 1^k d'eau bouillante et 1^k de glace on aura 2^k d'eau à 12°, 5. La chaleur de m' tirée de ces formules donne le poids de glace nécessaire pour refroidir une masse d'eau à un degré donné. Quelle quantité de glace faut-il pour ramener à 5° 12 litres d'eau qui sont à 25°? on a

$$m' = m\left(\frac{t - \theta}{75 + \theta}\right) = 12^k\left(\frac{25 - 5}{75 + 5}\right) = 3^k$$

2° Si $m\,t = 75\,m'$, toute la glace se fond et le mélange est à o°. Ce serait le cas de 1^k de glace mêlé avec 3^k d'eau à 25°

3° Si $m\,t < 75\,m'$, la température reste à o°, mais toute la glace n'est pas fondue : on a $p = \frac{mt}{75}$ pour le poids de celle qui peut l'être (1191) ; on trouve ainsi qu'en mêlant de l'eau à 50° avec un poids égal de glace, les $\frac{2}{3}$ de celle-ci seraient fondus.

Chaleur dégagée pendant la formation de la glace.

1193. Nous savons qu'il se dégage de la chaleur pendant la congélation de l'eau (973), et d'après le principe relatif à la chaleur latente (1173), nous voyons qu'il s'en dégage 75 unités pour 1^k seulement. Cela explique la lenteur que nous avons remarquée dans la congélation, même par un temps très froid et la permanence de la température à o° pendant tout le temps que la glace se forme. Il y a évidemment alors dans l'eau même une provision de chaleur qui ne s'épuise que peu à peu. Pour que la con-

gélation se fît instantanément dans la masse entière, il faudrait que la température fût descendue au moins à 75° au-dessous de zéro. Aussi, dans les hivers les plus rigoureux on ne voit jamais à l'état de glace qu'une très petite fraction de l'eau des rivières et des lacs.

1194. Les procédés pour déterminer la chaleur spécifique peuvent aussi servir à mesurer la chaleur dégagée pendant le passage de l'état liquide à l'état solide. Qu'on prenne une substance à l'instant même où elle achève de se fondre, et qu'on absorbe avec de l'eau ou de la glace la chaleur qu'elle abandonne en se refroidissant à un degré déterminé : il n'y aura plus qu'à retrancher la chaleur libre pour avoir la chaleur latente. Si, par exemple, on a constaté par la méthode des mélanges, ou par le calorimètre, que 1^k d'étain pris à son point de fusion, c'est-à-dire à 228°, a donné 23,7 unités de chaleur en s'abaissant à 28°, on retranchera $0{,}052 \times 200$ pour la chaleur due au refroidissement de l'étain solide, et il restera 13,3 pour la chaleur dégagée par la solidification. La marche générale est assez simple, comme on voit; mais l'opération est réellement très délicate, et demande des corrections multipliées. Le nombre que nous venons de citer pour l'étain est exact; pour le plomb on a seulement 5,8.

Mesure de la chaleur dégagée pendant la solidification.

1195. Plusieurs substances, quand on les mêle, constituent, en vertu d'une action chimique, des corps véritablement nouveaux dont le point de fusion est placé très bas. Ainsi 3 parties de glace et 1 de sel marin mêlées bien intimement forment en quelque sorte une nouvelle espèce de glace dont le point de fusion est à 20° au-dessous de zéro; si on fait le mélange à une température plus élevée, une portion de la masse fond en enlevant de la chaleur au reste qui se trouve ainsi amené à la température de la fusion; puis, tant que celle-ci dure, le thermomètre demeure stationnaire à — 20°, comme il le serait à 0° dans la glace. Tout cela suppose le mélange parfait, et assez froid d'avance pour que sa chaleur ne soit pas plus grande que celle que peut absorber la fusion. Voici les mélanges frigorifiques les plus employés :

Mélanges réfrigérants. Idée qu'on doit s'en faire.

Abaissement du thermomètre.

1	Acide sulfurique à 41°... 3 Sulfate de soude cristallisé 4		de + à — 8°.
2	Eau.................. 1 Nitrate d'ammoniaque.. 1		de + 10° à — 15°.
3	Glace................ 3 Sel marin............ 1		de 0° à — 20°.
4	Neige............... 2 Chlorure de calcium cristallisé.............. 3		de — 20° à — 55°.
5	Neige............... 4 Acide sulfurique étendu. 5		de — 55° à — 68°.

Cet acide contient 2 parties d'acide concentré, 2 d'alcool et 1 d'eau.

Manière d'opérer.

1196. Pour obtenir tout l'effet indiqué, il faut que les substances soient très divisées : ainsi, les sels devront être finement pulvérisés, la glace bien pilée ; la neige non tassée serait encore préférable. Le mélange doit se faire très exactement et le plus rapidement possible, dans des vases qui ne puissent pas lui donner beaucoup de chaleur. Il est d'ailleurs nécessaire d'opérer dans un lieu frais et sur des masses un peu considérables, pour que les causes extérieures de réchauffement n'aient pas trop d'influence. Si la température est trop élevée, on rafraîchit les substances dans un mélange préalable, avant de les employer ; cela est particulièrement nécessaire pour le mélange n° 4, qui sert à la congélation du mercure ; le sel et la neige sont refroidis d'avance dans le mélange précédent.

Pour celui-ci, il n'est pas bien nécessaire de prendre le sel à 0°, pourvu que les quantités soient un peu grandes ; on peut d'ailleurs augmenter le froid en ajoutant du chlorure de calcium. C'est dans ce mélange que les limonadiers plongent les *sorbetières* qui contiennent les crèmes ou les jus de fruits, pour la préparation des glaces. Ces vases en étain ou en argent sont très minces et cannelés,

afin de présenter une plus grande surface. Le mélange n° 1 est assez économique pour faire de la glace. On opère dans une auge AB, dans laquelle on en plonge une beaucoup plus étroite en fer-blanc *ab* contenant l'eau à faire geler; on détache ensuite la glace en chauffant légèrement. Fig. 335.

Distinction entre le froid produit et la chaleur absorbée.

1197. Un corps plongé dans un mélange frigorique même bien fait ne descend pas toujours à la température marquée dans la table : cela se conçoit en observant qu'un corps mis en contact avec une petite quantité de glace peut fort bien ne pas descendre à zéro, quoique la glace soit à cette température pendant tout le temps que dure la fusion, à plus forte raison ne faut-il pas s'imaginer que de l'eau doive nécessairement s'y geler. Un mélange d'un poids donné ne peut rendre latente, par sa fusion, qu'une quantité de chaleur déterminée ; fût-il capable de descendre à 50° au-dessous de zéro, il ne produirait pas la plus petite aiguille de glace dans 1k d'eau à 10° s'il n'absorbe au moins 10 unités de chaleur. D'ailleurs tel mélange qui fait descendre le thermomètre plus bas qu'un autre peut fort bien, à poids égal, ne pas absorber autant de chaleur.

Moyen de mesurer celle-ci.

Jusqu'à présent on s'est plutôt occupé du degré de froid rendu qu'on pourrait atteindre que de la quantité de chaleur latente; celle-ci pourrait s'évaluer par le refroidissement produit dans une masse connue d'eau, ou par le poids de la glace formée dans de l'eau prise à zéro.

§ III. *Chaleur dégagée par la liquéfaction et absorbée par la vaporisation.*

Chaleur totale des vapeurs.

1198. Pour terminer ce qui regarde la chaleur latente, il nous reste à parler de celle des vapeurs. Voyons d'abord comment on mesure leur chaleur totale. Pour l'eau, par exemple, la vapeur provenant d'une cornue où le liquide est en ébullition sera conduite dans une masse connue d'eau froide, de manière qu'elle s'y condense en entier. On rentre ainsi dans la méthode des mélanges; mais comme l'opération dure un certain temps, il faut compenser les pertes de chaleur par le procédé de Rumford (1161).

Voici les résultats d'une expérience de M. Gay-Lussac : la masse d'eau froide y compris le vase évalué en eau pesait 1k; la température était d'abord à 10°; par la condensation de 10 grammes de vapeur à 100° elle s'est élevée à 16°,15; il y avait donc d'abord 10 unités de chaleur, puis 16,3115, d'où il suit que la vapeur en a apporté 6,3115, ce qui revient à 631,15 par kilogramme. D'après la moyenne de ses expériences, M. Dulong admet 643 unités de chaleur dans 1k de vapeur d'eau à 100°. M. Despretz a trouvé pour l'alcool 255, pour l'essence de térébenthine 149, pour l'éther sulfurique 109. Ces vapeurs provenaient du liquide à la température de l'ébullition (1126). Avec l'appareil dont se servait M. Dulong, on pouvait mesurer la chaleur de la vapeur pour une température inférieure au point ordinaire d'ébullition. La cornue contenant le liquide s'abouchait dans un serpentin qui communiquait avec la machine pneumatique, de sorte qu'on déterminait l'ébullition à des températures très basses. La vapeur parcourait un serpentin entouré d'eau froide; à mesure qu'elle se liquéfiait, le liquide provenant de la condensation s'amassait dans un vase plongé dans la même eau que le serpentin, où il continuait à se refroidir, abandonnant ainsi toute la chaleur qu'il avait au-dessus de la température finale du mélange.

Procédé pour la mesurer.

Chaleur latente. Sa mesure.

1199. De tout ce que nous venons de dire on peut conclure que quand 1k d'eau est arrivé à 100°, il faut encore lui donner 543 unités de chaleur, uniquement pour le transformer en vapeur, sans que cela élève en rien sa température; mais à la rigueur on ne peut pas prendre ces 543 unités pour la mesure de la chaleur latente, si on entend par là celle qui constitue l'état gazeux. Celle-ci est certainement plus grande, puisque 1k de vapeur d'eau n'a pas besoin d'une unité de chaleur pour s'élever de 1°; et si on adopte 0,5 pour la chaleur spécifique (1172), il restera 593 unités pour la chaleur latente.

La chaleur totale est sensiblement constante au-dessus de 100°.

1200. Un fait d'une haute conséquence pour l'économie des machines à vapeur, c'est que la chaleur totale de la vapeur d'eau est à très peu près la même à toute température

au-dessus de 100°, de sorte qu'il ne faut pas plus de charbonpo ur produire 1k de vapeur à 5 atmosphères qu'à une seule. Dans une expérience de M. Clément Désormes on voit que 14,5 de vapeur à 152°,25 arrivant dans 290k d'eau à 20° ont porté la température à 49°,25, d'où l'on tire 632 unités pour la chaleur totale par kilogramme, comme dans l'expérience citée plus haut. Ce résultat d'ailleurs peut se concevoir, en observant que la chaleur spécifique de la vapeur à poids égal doit diminuer à mesure que la densité augmente (1155). Si, par exemple, elle n'est plus que $\frac{1}{3}$, terme moyen entre o et 150°, on aura 50 unités pour la chaleur libre à cette température comme à 100°, et par suite la même somme totale, puisque la chaleur latente ne change évidemment pas. M. Dulong pense que la chaleur totale augmente un peu avec la température, mais trop peu pour qu'on ait à en tenir compte dans l'industrie.

1201. La grande quantité de chaleur nécessaire à la constitution de la vapeur explique pourquoi il faut tant de temps pour évaporer une masse d'eau un peu considérable dans les appareils ordinaires. Et même dans les chaudières à vapeur, avec le feu le plus violent qu'on puisse momentanément soutenir pour une expérience, on vaporise à peine en une heure 100 grammes d'eau par décimètre carré de surface de chauffe. Dans le service habituel on n'en obtient généralement pas plus de 30 ou 40, de sorte que si une chaudière doit fournir 100k de vapeur par heure, il faut qu'elle présente à la flamme une surface de 4 mètres carrés environ. Il faut observer qu'ici les choses ne se passent plus comme pour l'évaporation à l'air; la quantité de vapeur formée dépend de l'étendue, non de la surface libre, mais de la surface chauffée. Cela se conçoit, puisque tout dépend de la quantité de chaleur que reçoit le liquide. Pourvu que la pression puisse être vaincue, il se dégagera toujours 1k de vapeur pour 643 unités de chaleur introduite. Aussi, M. Christian a vu qu'une chaudière qui évaporait 3k d'eau en 3′ quand elle était entièrement ouverte,

Applications. Lenteur remarquable de la vaporisation.

Grandeur des chaudières pour fournir un poids déterminé de vapeur.

Tout dépend des surfaces de chauffe. produisait encore le même effet quand il ne restait plus qu'un petit orifice de deux lignes de diamètre.

Chauffage à la vapeur. 1202. Pour ne pas se faire une idée fausse du chauffage à la vapeur, il faut remarquer que la vapeur ne produit pas de chaleur par elle-même: elle donne simplement ce qu'elle a reçu, et de quelque manière qu'on s'y prenne, par le chauffage direct ou autrement, il faut toujours brûler la même quantité de combustible pour obtenir un effet calorifique donné; seulement avec la vapeur les pertes sont moindres parce qu'on n'est pas obligé de multiplier les foyers, et qu'on peut au même instant porter la chaleur partout où l'on veut. Ainsi dans les teintureries, les papeteries et divers ateliers où l'on a un grand nombre de cuves à chauffer, une seule chaudière peut suffire: il n'y a qu'un robinet à tourner pour que la vapeur amenée par un tuyau dans l'eau froide les porte en quelques minutes à l'ébullition. On n'a pas besoin de vases en métal comme dans le chauffage direct, et de plus on ne craint pas l'altération des matières qui pourraient se déposer; peu importe d'ailleurs que la chaudière à vapeur soit au-dessous ou au-dessus des cuves, la vapeur arrive toujours; tandis qu'il faudrait des dispositions particulières ou des machines pour amener de l'eau chaude, ainsi que cela se fait encore dans les établissements de bains.

Ses avantages dans les usines.

On ne chauffe pas toujours en condensant la vapeur dans le liquide même; par exemple, pour des évaporations elle circule dans un double fond sous la chaudière ou dans un serpentin qui passe à travers le liquide.

Calorifère à vapeur. 1203. Il y a en général de l'avantage à chauffer les grands bâtiments par la vapeur; non-seulement quand on a de la vapeur de reste comme dans les ateliers où l'on emploie des machines à haute pression, mais même en établissant des chaudières qui n'ont pas d'autre usage. A Paris, la Bourse, le Théâtre-Italien, la nouvelle salle de l'Institut sont chauffés par la vapeur. On obtient ainsi dans des bâtiments très vastes une température bien plus uniforme qu'avec des calorifères à air chaud. Pour avoir une idée de ce genre de chauffage considérons un calorifère pour un édifice à trois

étages. La chaudière A est ordinairement placée dans une cave. Un tube B conduit la vapeur dans les tuyaux de *chauffe* CCC, EEE, etc., qui sont en fonte et ont 12 ou 15 centimètres de diamètre. Les verticaux s'emboîtent par des *compensateurs* DDD, de manière à pouvoir se dilater et se contracter par les changements de température sans nuire à la solidité de l'appareil. Les horizontaux, légèrement inclinés pour l'écoulement de l'eau de condensation, posent sur des rouleaux mobiles *eee*; ils sont fixés par un bout, mais par l'autre ils s'abouchent dans le tube vertical GGG, à l'aide de petits tuyaux courbes en plomb *ggg* qui leur permettent de s'allonger et de se raccourcir. Le tube GG ramène l'eau condensée dans la chaudière. On voit que ce système est fermé; mais comme la vapeur ne s'y répandrait que très lentement si l'air y restait (1079), on ouvre le robinet H dès qu'on commence à chauffer; l'air sort par là; on ferme ensuite quand la vapeur arrive. Il se fait, comme on voit, une véritable distillation. L'air s'échauffe et se renouvelle continuellement autour des tuyaux de condensation; leur température approche de 100°. Quand l'air est arrivé à 15°, il se liquéfie terme moyen 1 ^{k} de vapeur par heure pour 1 mètre carré de surface de chauffe; il y a donc environ 900 unités de chaleur transmises, qui pourraient porter 170 mètres cubes d'air de 0 à 15°; mais à cause de la ventilation nécessaire et de la chaleur absorbée par les murailles, on ne compte guère que sur le tiers de cet effet, c'est-à-dire qu'il faudrait environ 1 mètre carré de surface de chauffe pour un espace de 60 mètres cubes. Fig. 336.

1204. Un bain de vapeur est une espèce de brouillard extrêmement chaud qu'on produit en faisant pénétrer un jet de vapeur dans un espace fermé. La saturation a lieu immédiatement, de sorte que la vapeur se condense à mesure qu'elle arrive, abandonnant sa chaleur latente à l'air et à tout ce qu'elle touche. On voit d'après cela que, toutes choses égales, on reçoit dans un bain de vapeur bien plus de chaleur que dans l'air sec; et comme en outre il n'y a pas d'évaporation possible puisque l'espace est saturé, la température de la peau s'élève si rapidement, qu'on ne peut Bains de la vapeur.

guère séjourner qu'un petit nombre de minutes. On modère l'effet du bain en en laissant arriver la vapeur par *chauffes* d'une ou deux minutes.

Questions sur les mélanges de vapeur et d'eau. 1205. Il est facile de résoudre diverses questions sur les mélanges d'eau et de vapeur en considérant que 1^k de vapeur porte 643 unités de chaleur avec lui. La formule (A) (1146) devient ainsi $mt + 643\,m' = (m + m')\,\theta$, m est le poids de l'eau, t sa température, m' le poids de la glace et θ la température du mélange.

Quelle quantité d'eau à 10° faut-il mêler à 1^k de vapeur pour que la température soit de 20° ? On trouve $m = 62^k,3$. Cela montre quelle quantité d'eau froide consomment les machines à condensation (1063).

Quelle quantité de vapeur faut-il condenser dans 100^k d'eau à 15° pour porter le tout à l'ébullition ? on a $m = 15^k,65$; c'est là le minimum, mais il faut bien compter sur 18 ou 20_k à cause de la chaleur perdue.

En posant $643\,m' - 75\,m = 0$ on voit que la vapeur et la glace, pour se liquéfier réciproquement, doivent être dans le rapport de 75 à 643, ou de à 1 à 9 à peu près.

Froid produit par l'évaporation. 1602. C'est un fait bien reconnu que l'évaporation produit du froid. Ainsi un peu d'éther versé sur la main occasionne un froid très vif, surtout si on agite pour favoriser l'évaporation : on sait que le vent paraît bien plus frais quand la peau est mouillée que quand elle est sèche ; les arrosements rafraîchissent, même quand l'eau n'est pas plus froide que le sol sur lequel on la verse.

Alcarazas. 1207. Pour rafraîchir l'eau on la met dans des vases de terre poreux appelés *alcarazas*, dont la surface se trouve toujours humide; de sorte qu'il se fait une évaporation continuelle. On obtient le même effet avec des vases en métal qu'on enveloppe de linges mouillés. On se rend parfaitement compte du froid dû à l'évaporation, quand on se rappelle que la vapeur, en se formant, absorbe de la chaleur qui devient insensible au thermomètre.

Congélation de l'eau. 1208. Une expérience de Leslie montre que la chaleur enlevée par la formation de la vapeur même froide est fort considérable. Sous le récipient de la machine pneumati-

que on met un vase très large contenant une couche de 2 ou 3 centimètres d'acide sulfurique très concentré; par-dessus on établit une capsule métallique peu profonde contenant 15 à 20 grammes d'eau; elle pose par trois pieds sur les bords mêmes du vase contenant l'acide, dont la surface reste ainsi bien à découvert. On enlève l'air, et on ferme les robinets; l'évaporation, comme nous savons, se fait très rapidement dans le vide, et ici elle ne peut pas s'arrêter parce que l'acide absorbe la vapeur à mesure qu'elle se forme: aussi, par une température de 20°, l'eau est gelée en 5 ou 6'. Comme l'évaporation continue après la congélation, la glace descend à plusieurs degrés au-dessous de zéro, on est même parvenu à congeler du mercure mis en contact avec elle. La congélation de ce métal peut se faire à l'air libre, en mouillant avec de l'acide sulfureux la boule d'un thermomètre. M. Bussy a obtenu ainsi un froid de — 57° sur le thermomètre à air, et même de — 68°, en opérant dans le vide au-dessus d'un vase contenant de la potasse humectée pour absorber l'acide. Avec l'acide carbonique liquide M. Thilorier a fait descendre le thermomètre à alcool de 20° à — 90°; c'est vers cette température que l'acide se solidifie par sa propre évaporation.

Du mercure.

De l'acide carbonique.

1209. Nous conclurons des expériences précédentes que la vapeur froide qui se forme aux plus basses températures absorbe encore une quantité de chaleur très considérable; et pour la vapeur d'eau en particulier, nous ne nous éloignerons certainement pas beaucoup de la vérité en admettant qu'à 0° elle contient presqu'autant de chaleur qu'à 100°. En effet, il est naturel de penser que la chaleur latente, c'est-à-dire celle qui est nécessaire pour constituer l'eau à l'état de gaz, reste la même aux différentes températures; on aurait déjà de cette manière 593 unités. De plus la chaleur spécifique augmente à mesure que la vapeur est moins dense: il peut donc y avoir ainsi, en partie du moins, compensation. D'après cela et d'après quelques vérifications indirectes, nous admettrons par approximation que la chaleur totale de la vapeur d'eau

Mesure de la chaleur absorbée par la vapeur aux basses températures.

est encore d'environ 600 unités dans les basses températures.

Calcul de l'évaporation capable de produire un refroidissement donné.

1210. En partant de là il est facile de calculer la perte qu'une masse donnée d'eau doit faire par l'évaporation, pour se refroidir d'un certain nombre de degrés, ou même se geler. Si on veut, par exemple, refroidir de 8° une masse d'eau pesant 3^k, il faut lui enlever 24 unités de chaleur; or $\frac{1}{600}$ de kilog. de vapeur enlève une unité, il faudra

Calcul de l'évaporation capable de congeler une quantité donnée d'eau.

donc ici l'évaporation de $\frac{3^k \times 8}{600} = 0^k,04$. Si l'eau est alors à 0° et qu'on veuille la faire geler, on devra en vaporiser $\frac{1}{9}$; car, en supposant pour un instant qu'on ait à faire à 9^k: on voit bien que 1^k emporte en se vaporisant les 600 unités que doivent perdre les 8 autres pour passer à l'état de glace. De là il est aisé de conclure que si on désigne par x le poids de la vapeur qui doit se former pour qu'une masse m d'eau prise à la température t se congèle, on a

$$x = m\left(\frac{75+t}{675}\right)$$

Remarque.

1211. Nous supposons l'évaporation assez rapide pour que les corps environnants n'aient pas le temps de restituer une quantité notable de chaleur. C'est à peu près le cas de l'expérience de Leslie, qui peut ainsi servir à vérifier si la chaleur absorbée par la vapeur est à peu près telle que nous l'avons supposé. Il suffirait d'opérer à 0° et de voir si $9^{gr.}$ d'eau à 0° se réduisent à $8^{gr.}$ au moment de la congélation.

Limite du froid produit par l'évaporation.

1212. Le froid produit par l'évaporation est limité, parce que la tension diminuant à mesure que la température s'abaisse, la quantité de vapeur formée à chaque instant diminue aussi; la chaleur perdue allant ainsi en décroissant, tandis que la chaleur reçue des corps environnants reste la même, il arrive nécessairement une époque où ces deux quantités sont égales, alors la température est stationnaire. Pour avoir une limite plus basse, il faudrait diminuer la

chaleur envoyée par les corps environnants, ou augmenter celle qui est enlevée par l'évaporation. On obtient le premier effet en opérant par un temps froid, on en entourant l'appareil de corps très froids. Ainsi, dans l'expérience de Leslie, on obtient à coup sûr la congélation du mercure en enveloppant le récipient d'un mélange réfrigérant de glace et de sel. Quant au second effet, on l'obtient par tous les moyens qui favorisent l'évaporation sans donner de chaleur, car il ne faudrait pas s'imaginer, par exemple, qu'un thermomètre mouillé va se refroidir par l'évaporation au soleil ou devant le feu; seulement il s'échauffera moins. Considérons donc une masse liquide arrivée à sa limite de refroidissement; il est clair que cette limite s'abaissera si l'air devient plus sec, il en sera de même si on raréfie l'air, et à plus forte raison si on l'enlève ainsi que la vapeur qui se forme.

1213. La limite s'abaissera encore si on augmente la surface d'évaporation, sans augmenter celle par laquelle entre la chaleur du milieu ambiant: c'est le cas des alcarazas, comparés aux vases qui ne laissent à découvert qu'une partie du liquide; mais si déjà celui-ci avait sa surface entièrement libre, comme cela aurait lieu pour une goutte d'eau suspendue dans l'air, il n'y aurait pas d'avantage à multiplier les surfaces; on augmenterait la chaleur reçue dans la même proportion que la chaleur perdue.

Influence de la surface.

1214. Par la même raison, on ne peut pas espérer que l'agitation de l'air fera descendre la limite. Si ce fluide double l'évaporation en se renouvelant, il apporte aussi deux fois autant de chaleur. Mais si la multiplication des surfaces ou la rapidité du vent n'ont pas d'influence sur le refroidissement définitif, elles en ont une très marquée sur le temps nécessaire à ce refroidissement. Qu'on laisse en repos la boule d'un thermomètre, après l'avoir entourée d'un linge mouillé, il lui faudra peut-être un quart d'heure pour atteindre la limite du refroidissement; tandis que si on fait tourner l'instrument comme une fronde, une demi-minute suffira. Si on place les alcarazas dans des courants d'air, ou si on les fait osciller après les avoir suspendus, ce

L'air agité ne refroidit pas davantage.

Seulement il refroidit plus vite.

n'est pas pour obtenir un froid plus grand, c'est pour l'obtenir plus vite. Dans certaines brasseries, on accélère le refroidissement du moût en versant une couche de 4 à 5 pouces dans des cuviers très larges et en faisant tourner une espèce de volant tout près de la surface. Ce volant fait 120 révolutions par minute : en 2^h on refroidit ainsi 4000 litres de moût, ce qui demandait 10 heures autrefois.

La multiplication des surfaces agit de même.

1215. Quant à la multiplication des surfaces pour accélérer le refroidissement, c'est un moyen continuellement employé; ainsi on agite les liquides, on les verse de haut, etc. On sait qu'un linge mouillé se refroidit bien plus vite si on l'étend, que s'il présente peu de surface, quoiqu'il arrive toujours à la même température finale.

La limite du refroidissement est plus basse pour les liquides plus volatils.

1216. Il est évident que la limite doit être plus basse pour les liquides plus volatils, car si par exemple lorsque l'eau l'a atteinte, on remplace ce liquide par de l'éther, la chaleur reçue l'instant d'après sera de même employée tout entière à la vaporisation, sans changer la température; de sorte qu'en vertu de l'excès de tension, une nouvelle quantité de liquide devra se vaporiser aux dépens de la chaleur du reste.

Il ne s'ensuit pas qu'à poids égal ils enlèvent plus de chaleur.

1217. De ce qu'on peut pousser le froid plus ou moins avec un liquide plus volatil, il ne faudrait pas conclure qu'à poids égal il enlève plus de chaleur. Ainsi M. Thilorier pouvait à peine congeler un petit globule de mercure avec l'acide carbonique liquide, qui donne un froid de — 90°, tandis qu'avec un mélange d'éther et de cet acide dont l'évaporation était loin de produire un abaissement aussi grand, il congelait 50 grammes de mercure en quelques secondes. Un jet de ce mélange produisait sur le doigt une sensation de froid intolérable, tandis qu'avec l'acide pur, l'effet était bien plus superficiel. Tout cela se conçoit quand on se rappelle que les liquides absorbent, pour se vaporiser, des quantités de chaleur très différentes (1198); que l'eau, par exemple, en prend 6 fois autant que l'éther; de sorte que ce dernier liquide, fût-il à 100° au-dessous de zéro, absorberait, pour se vaporiser, tout au plus le tiers de ce que prendrait l'eau en partant de la température ordinaire.

1218. M. Gay-Lussac a fait une série très remarquable d'expériences sur le froid dû à l'évaporation de l'eau dans l'air sec à différentes températures. L'air sortait d'un gazomètre, se desséchait sur du chlorure de calcium, et arrivait contre la boule d'un thermomètre revêtu de batiste entretenue humide. Nous savons que la vitesse du courant est sans influence (1214), de sorte que les résultats sont vrais pour l'air calme ou agité. Froid dû à l'évaporation de l'eau dans l'air sec.

Température de l'air.	Abaissement.	Température de l'air.	Abaissement.
0°	5°,82	13°	10°,07
1	6,09	14	10,44
2	6,37	15	10,82
3	6,66	16	11,20
4	6,96	17	11,58
5	7,27	18	11,96
6	7,59	19	12,34
7	7,92	20	12,73
8	8,26	21	13,12
9	8,61	22	13,51
10	8,97	23	13,90
11	9,37	24	14,30
12	9,70	25	14,70
		30	16,74

1219. On voit par ce tableau quelle influence aurait la sécheresse de l'air sur la température de l'eau; dès que le thermomètre serait au-dessous de 8° il pourrait se former de la glace; dans une atmosphère à 30°, les surfaces humides descendraient à 13°,26. Les expériences ont été faites sous la pression 0m,76; mais avec de l'air raréfié, on a eu des abaissements plus grands encore. Ainsi sous une pression de 0m,50 par une température de 10°, le thermomètre est descendu à — 2°; c'est donc 12° d'abaissement au lieu de 8,97. Il suit de là que dans les hautes régions, à sécheresse égale, l'évaporation produit plus de froid et nous savons que la sécheresse est plus grande. Observations.

1220. Le refroidissement qu'on obtient avec les alcarazas n'atteint jamais celui qu'indique ce tableau, parce que Dans l'air humide.

l'air est toujours plus ou moins humide. On peut calculer approximativement l'abaissement à espérer en multipliant celui de la table par le complément du degré d'humidité. Si, par exemple, l'hygromètre marque 64°, le degré d'humidité est 0,41, dont le complément est 0,59; $14,7 \times 0,59 = 8°,6$ est l'abaissement à espérer en supposant l'air à 25°; ainsi l'eau pourrait descendre à 17°. Cette règle n'est applicable que pendant l'été, c'est-à-dire pour la température de 20 à 30°; on pourra d'ailleurs mesurer très vite l'abaissement possible en faisant tourner en fronde un thermomètre dont la boule sera couverte de coton mouillé.

Chaleur enlevée au globe par l'évaporation.

1221. D'après l'évaporation moyenne à la surface des eaux et du sol on voit quelle énorme quantité de chaleur se trouve ainsi enlevée; mais cette chaleur reparaît quand la vapeur repasse à l'état liquide; et, comme cela arrive surtout dans les hautes régions, il en résulte que les vapeurs contribuent puissamment à tempérer le froid qui y règne.

Chaleur enlevée aux végétaux.

1222. C'est évidemment l'évaporation qui empêche les végétaux de s'échauffer comme le feraient des substances sèches; et la chaleur ainsi absorbée est très considérable, puisque sur le *soleil* dont nous avons parlé, et qui ne pesait pas 3 liv. l'évaporation en 12 heures enlevait tant à la plante qu'à l'air ambiant, plus de 350 unités de chaleur, ce qui eût été suffisant pour faire bouillir au moins 7 livres d'eau prises à la température de la glace fondante.

Chaleur enlevée à l'homme.

1223. L'évaporation par les poumons fait perdre à l'homme environ 300 unités de chaleur par jour. L'évaporation à la surface de la peau ferait perdre plus de 500 unités, sans les vêtements qui absorbent une partie de l'humidité, à mesure qu'elle est exhalée. En admettant 600 unités pour la perte totale, on voit que sans l'évaporation, la température du corps s'élèverait de plus de 10° en un jour, car la chaleur perdue suffirait pour élever de 10° la température d'une masse d'eau de 60 k.

L'évaporation sert à régler la température.

1224. Comme l'évaporation croît et décroît avec la chaleur, c'est évidemment un régulateur de notre température. Dans une étuve chauffée à 90°, la perte de chaleur, d'a-

près ce que nous avons vu, est au moins 20 fois aussi grande que dans les circonstances ordinaires; aussi la température du corps s'élève à peine d'un degré, du moins quand on ne reste que quelques minutes. Dans une étuve humide, c'est-à-dire chauffée par la vapeur, l'évaporation n'étant plus possible, on ne supporte pas, à beaucoup près, des températures aussi élevées. Fordyce rapporte qu'il ne put rester que quelques minutes dans une étuve humide chauffée à 49°; le thermomètre placé sous la langue marquait 43°,3, de sorte que la température du corps s'était élevée déjà de plus de 6°; le pouls donnait 145 pulsations.

CHAPITRE VIII.

PROPAGATION DE LA CHALEUR.

§ I. *Conductibilité.*

1225. Lorsqu'on chauffe un corps par une extrémité, on sait que la chaleur se propage dans le reste de la masse. On appelle *conductibilité* cette propriété qu'ont les corps de transmettre ainsi la chaleur de molécule à molécule. Conductibilité des solides.

1226. Sous le rapport de la conductibilité, il y a de grandes différences entre les diverses substances. Ainsi, on tient sans se brûler un morceau de bois très court dont une extrémité est enflammée, tandis qu'on ne saisirait pas impunément une barre de fer de même dimension dont un bout serait chauffé jusqu'au rouge. Par des expériences vulgaires on sait que les métaux sont de *bons conducteurs*; qu'au contraire les substances végétales et animales, le verre, la cire, etc., conduisent la chaleur difficilement. Une pièce de viande brûle quelquefois d'un côté pendant qu'elle est encore froide de l'autre. Un tube de verre peut être fondu à un bout sans s'échauffer quelques pouces plus loin. Il en est de même de la cire à cacheter, d'une bou- Bons et mauvais conducteurs. Moyens ordinaires de les distinguer.

gie ordinaire, d'un bâton de soufre, etc. L'ébullition cesse aussitôt dans un vase de métal qu'on retire du feu; elle continue au contraire dans un vase de terre, parce qu'il y reste une certaine quantité de chaleur qui n'a pas été transmise à l'eau à mesure qu'elle pénétrait dans les parois; aussi celles-ci en dehors s'élèvent-elles pendant l'ébullition à une température bien supérieure à 100°.

Sensations de froid au contact.

1227. On distingue encore les bons et les mauvais conducteurs par le froid plus ou moins vif qu'on sent en les touchant; ainsi à la même température les métaux nous paraissent bien plus froids que le bois, que la paille, que la laine, etc. Mais ici il faut observer que le phénomène est complexe; tout ce que nous sentons c'est la perte de chaleur; or la substance que nous touchons peut nous en enlever beaucoup, non-seulement parce que les molécules de la surface la transmettent rapidement aux autres, mais encore parce que ces molécules peuvent exiger beaucoup de chaleur (1145) pour se mettre en équilibre avec notre température. Voilà pourquoi le marbre paraît aussi froid qu'un métal, quoiqu'il conduise plus mal la chaleur; le verre est dans le même cas. Le poli a encore une grande influence puisqu'il permet un contact plus intime, et par suite le refroidissement d'un plus grand nombre de points.

Ordre de conductibilité. Expérience d'Ingenhousz. Fig. 337.

1228. Une expérience d'Ingenhouz fait aisément reconnaître l'ordre dans lequel les métaux et certains corps solides doivent être rangés relativement à la conductibilité. Sur une des parois d'un vase de cuivre M N, on fixe perpendiculairement de petits cylindres *a b c...* d'argent, de cuivre, de fer, de verre, de bois, etc. Ces cylindres sont parfaitement égaux et enduits d'une couche de cire. On verse de l'eau bouillante ou de l'huile très chaude dans le vase et on juge de la conductibilité par la distance où la cire se trouve fondue sur chaque cylindre à un instant donné. La fusion a déjà lieu à l'extrémité de l'argent quand elle commence à peine sur le bois. Voici l'ordre assigné par cette expérience:

Or, argent, cuivre, étain, fer, zinc, plomb, verre, marbre, porcelaine, poterie, charbon, bois.

1229. Pour juger de la conductibilité des substances en lames minces, des étoffes par exemple, on peut se servir du *thermomètre de contact*, imaginé par Fourier. C'est un vase ayant la forme d'un entonnoir renversé; il est fermé inférieurement par une membrane tendue et contient du mercure où plonge un thermomètre. On étend l'étoffe sur un support chauffé d'avance, et posant l'instrument pardessus, on note le temps nécessaire pour que le thermomètre monte d'un certain nombre de degrés. En répétant l'expérience avec une autre étoffe sur le même support également chaud, et dans les mêmes circonstances, on détermine facilement laquelle des deux conduit mieux la chaleur. On trouve ainsi qu'à égalité d'épaisseur les tissus végétaux, comme le lin, le coton, etc., transmettent la chaleur plus vite que la soie ou la laine. On reconnaît que les substances filamenteuses ou divisées en parcelles sont très peu conductrices; on peut citer surtout la sciure de bois, le tan, le coton cardé, le duvet, etc. Il est aisé avec cet appareil d'étudier l'influence de l'épaisseur, de la superposition, etc. Il est à remarquer que le passage plus ou moins facile de la chaleur ne dépendpas seulement de la nature des substances et de l'épaisseur totale, mais aussi de l'ordre de superposition. Par exemple, une lame métallique entre deux morceaux de drap est sans influence, mais elle en a une très marquée quand elle est en contact avec le support ou avec l'instrument.

Thermomètre de contact.
Fig. 338.

1230. Avec les expériences précédentes on peut bien s'assurer qu'une substance conduit mieux la chaleur qu'une autre, mais on ne *mesure* pas la conductibilité. Cette mesure pourrait s'obtenir très exactement pour certains corps avec un appareil proposé par M. Dulong. On ferait avec la substance à éprouver un vase sphérique d'une épaisseur uniforme et connue qui plongerait dans un bain de glace fondante. On introduirait dans la cavité un courant de vapeur d'eau, de manière à entretenir la surface intérieure constamment à 100°; la surface extérieure serait toujours à 0°; et on mesurerait la conductibilité par la quantité de glace fondue dans un temps donné. Par un procédé moins direct

Mesure de la conductibilité.

M. Despretz est arrivé aux résultats suivants, qui pour les dernières substances ne doivent être regardés que comme approximatifs.

Or.....	1000	Fer...	374	Marbre..............	24
Platine..	981	Zinc..	363	Porcelaine..............	12
Argent..	973	Étain..	304	Terre des fourneaux.....	11
Cuivre..	898	Plomb.	180		

Cette table signifie, par exemple, que si dans l'appareil précédent il y a eu 898 grammes de glace fondue en opérant avec un vase de cuivre, il y en aurait dans le même temps seulement 374 avec un vase de fer de même épaisseur et de même surface.

Applications, chauffage.

1231. Dans la construction des fourneaux on a soin d'employer des substances peu conductrices pour éviter la déperdition de la chaleur; quelquefois même entre deux couches de briques on interpose une couche de charbon en poudre. Les poêles de tôle ou de fonte qui transmettent la chaleur très vite ne la conservent pas comme ceux de terre ou de faïence. Dans les contrées du Nord on a de grands poêles en briques qu'on allume seulement le matin pendant une ou deux heures; cette masse prend ainsi une provision de chaleur qu'elle cède ensuite peu à peu, de manière que l'appartement reste à 15 ou 16° pendant 24 heures, lors même qu'au dehors la température est à 15 ou 20° au-dessous de zéro. Mais il faut pour cela, comme l'observe M. Lamé, que les murs soient formés de substances peu conductrices; le bois convient très bien; des poutres de 8 à 10 pouces d'équarrissage, superposées horizontalement, dont les joints sont remplis avec de l'étoupe et dont l'ensemble est recouvert des deux côtés par des planches de deux pouces d'épaisseur, suffisent pour former une enceinte convenable. Quand les murs sont en briques, on leur donne une épaisseur de 2 ou 3 pieds. Les maisons de pierre ou de marbre sont très rares, et la théorie en indique la raison puisque le marbre conduisant la chaleur deux fois mieux que

la brique, il faudrait donner aux murs une épaisseur de 6 pieds pour produire le même effet.

1232. Nous avons vu avec quelle lenteur la chaleur du soleil pénétrait dans la terre (868) et nous concevons ce fait maintenant d'après l'imparfaite conductibilité des substances qui composent l'écorce du globe; réciproquement la chaleur intérieure de la terre doit se conserver presque indéfiniment comme l'observation d'ailleurs le démontre (889). Imparfaite conductibilité du sol.

1233. Quand la température de l'air descend à plusieurs degrés au-dessous de zéro on trouve constamment que la terre couverte de neige est moins froide que la terre nue, ce qui montre que la neige est une substance peu conductrice qui peut préserver les semences ou les plantes d'un froid trop grand. Imparfaite conductibilité de la neige.

1234. La glace se conserve très longtemps dans les glacières, d'abord parce qu'il faut une quantité énorme de chaleur pour fondre un poids considérable de glace et surtout aussi parce que la chaleur du dehors ne peut pénétrer que très difficilement à travers la terre et les pierres épaisses qui forment les parois. Glacières.

1235. Actuellement on transporte dans l'Inde de la glace prise aux États-Unis : mais pour ne pas tout perdre pendant un trajet de 4 mois au moins, à travers les mers les plus chaudes du globe, il faut isoler la glace en l'entourant de substances peu conductrices. On la taille en blocs réguliers qu'on range de manière à ne pas laisser de vide. La masse remplit une espèce de caisse qui occupe tout le corps du vaisseau, mais qui se trouve séparée de ses murailles par une couche épaisse de tan et de paille. Pour un trajet de 6 mois la perte a été de 55 tonneaux sur 180. On a aussi transporté de la glace de Suède en France, pendant l'été de 1834. Transport de la glace.

1236. Les vêtements par eux-mêmes ne donnent aucune chaleur, seulement ils conservent celle qui se développe par l'action de la vie; d'après cela il est évident que, toutes choses égales, ce sont les plus mauvais conducteurs qui fournissent les vêtements les plus chauds; la Vêtements.

laine, la fourrure, les étoffes ouatées, etc., en sont des exemples. Une toile métallique préserverait très mal du froid. Il est à remarquer que les mêmes enveloppes qui empêchent un corps de se refroidir l'empêcheraient aussi de s'échauffer; de sorte que s'il faut vêtir de laine un vase où l'on veut conserver de l'eau longtemps chaude, c'est aussi avec de la laine qu'il faut l'entourer s'il contient de la glace qu'on veuille empêcher de se fondre; sans enveloppe il recevrait du dehors une plus grande quantité de chaleur.

Imparfaite conductibilité du corps des animaux.

1237. La peau, le tissu cellulaire, la graisse conduisent très mal la chaleur; aussi la température de l'intérieur du corps reste-t-elle à 37° environ quand la surface et les extrémités sont à peu près à la température de l'air ambiant. Par suite, il est très difficile d'échauffer le corps artificiellement à une certaine profondeur. Les sachets de sable chaud qu'on applique sur la peau la brûlent quelquefois avant que l'intérieur se réchauffe. Si dans l'état de santé il suffit souvent de se tenir un instant devant le feu pour qu'un sentiment de chaleur se répande dans tout le corps, c'est que le feu agit comme un stimulant; nous nous réchauffons alors non comme des corps inertes, mais par la chaleur que nous développons nous-mêmes en plus grande quantité en vertu de l'excitation reçue.

Conductibilité des liquides.

1238. En général les liquides ne s'échauffent pas comme les solides; il s'y établit des courants (904), ce qui empêche de juger de la conductibilité; mais déjà par cela même qu'une molécule chaude parcourt un long trajet en s'élevant à travers le liquide froid, il est évident que la chaleur ne passe pas facilement d'une molécule à l'autre. D'ailleurs on peut faire en sorte qu'il n'y ait pas de courant, et alors on reconnait qu'en général les liquides sont de très mauvais conducteurs. Si par exemple on chauffe de l'eau par la partie supérieure en maintenant une plaque de fer rouge à une petite distance, la chaleur se propage vers le fond avec une excessive lenteur. Après avoir rempli un tube à moitié d'eau froide on verse par-des-

Elle est faible.

sus de l'eau très chaude qu'on peut même faire bouillir sans que la partie inférieure s'échauffe sensiblement. Une expérience encore fort remarquable consiste à fixer un morceau de glace au fond d'un vase, à verser par-dessus une couche d'eau froide de 2 ou 3 centimètres, puis une couche d'alcool qu'on enflamme; après la combustion on voit à peine quelques traces de fusion sur les aspérités de la glace.

1239. Quelques physiciens, notamment Rumford, ont nié la conductibilité des liquides, prétendant que le faible échauffement observé à une petite profondeur dans les expériences précédentes venait de la chaleur transmise par les parois des vases; mais voici une expérience qui démontre que les liquides peuvent transmettre la chaleur même sans qu'il y ait de courants. On remplit de mercure une cavité creusée dans un morceau de glace; au fond se trouve un thermomètre dont la tige sort latéralement à travers les parois; on maintient une plaque en fer rouge près de la surface du mercure et on voit le thermomètre monter. Ainsi l'état liquide n'empêche pas la conductibilité; l'expérience précédente montre même que le mercure conduit bien la chaleur; de sorte que si l'eau la conduit mal cela tient à sa nature et non à sa liquidité. Une preuve d'ailleurs que dans l'eau la chaleur passe d'une molécule à l'autre, c'est que quand on mêle exactement de l'eau chaude avec de l'eau froide on obtient toujours la même dilatation pour la même température, quelles que soient les proportions du mélange.

Mais non pas nulle.

1240. Par la manière dont s'échauffent les liquides on voit qu'il y a un grand avantage à appliquer la chaleur sur le fond des vases; si on l'appliquait seulement à une certaine hauteur sur les parois latérales, il n'y aurait pas de courants au-dessous de ce point et par conséquent très peu de chaleur transmise; dans certaines blanchisseries on profite des courants qui se forment dans les liquides échauffés pour établir une véritable circulation entre la chaudière et les cuviers à lessive. Les calorifères à eau chaude sont fondés sur le même principe; si par exemple

Applications. Chauffage par circulation.

Calorifères à eau chaude. Fig. 339. on échauffe l'eau en A, il y aura un courant continu ascendant par B et descendant par C. C'est par un appareil de ce genre que sont chauffés les couvoirs artificiels de M. Bonnemain.

Conductibilité des gaz. 1241. Les gaz s'échauffent très vite, comme on peut s'en assurer avec le thermomètre de Drebbel ou en présentant devant le feu une vessie presque pleine d'air ; la dilatation a lieu presque instantanément. Mais alors, comme dans les liquides, c'est par des courants que la chaleur se transmet, c'est-à-dire que les molécules viennent s'échauffer successivement par leur contact avec les parois; aussi quand on gêne les courants trouve-t-on que les gaz sont de très mauvais conducteurs. Rumford, ayant enfermé un thermomètre dans un ballon plein d'air, vit que la chaleur communiquée au ballon se transmettait au thermomètre bien plus lentement quand on mettait un peu d'édredon pour gêner les courants. Lorsque l'air est refroidi par le bas il n'y a pas de raison pour que les courants s'établissent, aussi trouve-t-on de grandes différences de température à des distances très petites en hauteur (867).

Elle est très faible.

Application. 1242. On voit, d'après cette imparfaite conductibilité, que les couches d'air interposées entre les vêtements sont un des meilleurs moyens de maintenir la chaleur, car les courants ne peuvent pas s'établir aisément dans des espaces aussi étroits. L'utilité des édredons dépend de la même cause; de même dans une fourrure, dans les étoffes ouatées, dans le plumage des oiseaux il faut compter l'air interposé comme faisant partie de l'enveloppe; on a ainsi une couche isolante qui réunit une grande légèreté à une grande épaisseur. D'après les expériences de Rumford, un vase chaud enveloppé d'une fourrure se refroidit plus vite quand le poil est en dedans; cela tient au moins en partie à ce que le tassement expulse une portion de l'air et diminue réellement l'épaisseur. L'imparfaite conductibilité explique encore comment la chaleur se maintient dans les nuages où il n'est guère possible qu'il s'établisse des courants (1126).

§ II. *Rayonnement de la chaleur.*

1243. Si on suspend dans l'air un boulet de fer rouge, on sent tout autour l'impression de la chaleur; on ne peut pas supposer que cet effet soit dû seulement à l'air échauffé, car l'air échauffé monte et on sent très bien la chaleur par-dessous et sur les côtés. D'ailleurs on sait que devant une cheminée il y a un rayonnement très sensible en sens inverse du courant d'air qui vient entretenir la combustion. Ainsi il est bien établi que la chaleur rayonne en tout sens à travers l'air comme la lumière. Nous avons supposé le boulet rouge, mais on a encore des effets très sensibles quand il ne l'est plus, ou même quand on le remplace par un vase rempli d'eau bouillante, de sorte que la propriété de rayonner appartient aussi bien à la chaleur obscure qu'à celle qui est accompagnée de lumière. A cause du froid qu'on observe sur les hautes montagnes, on avait prétendu que les rayons du soleil n'étaient pas chauds par eux-mêmes et qu'ils avaient besoin d'air à un certain degré de densité pour produire leur effet; c'est une erreur; Saussure, en concentrant les rayons avec une lentille, a obtenu sur le Mont-Blanc une chaleur plus intense que celle qu'il avait par le même procédé à Genève, ce qui tient sans doute à la plus grande transparence de l'air. Rayonnement dans l'air.

1244. Puisque la chaleur du soleil nous parvient à travers les espaces célestes, il est évident qu'elle n'a pas, comme le son, besoin d'air pour se propager. Quant à la chaleur obscure, une expérience de Rumford montre qu'elle se propage aussi dans le vide le plus parfait. On fixe un thermomètre au centre d'un ballon de verre en scellant la tige dans une tubulure ; on remplit entièrement de mercure ce ballon qui a un col d'un mètre environ, puis on le redresse, comme un baromètre, dans une cuvette ; le métal s'arrête à une hauteur de 0m,76 dans le col, dont on ramollit à la lampe la partie vide, qui s'aplatit et se ferme par la pression atmosphérique ; de Rayonnement dans le vide. Fig. 340.



sorte que le ballon détaché de son col se trouve absolument vide d'air. Or, si on le plonge dans de l'eau chaude on voit aussitôt le thermomètre monter. L'effet est trop prompt pour qu'on puisse l'attribuer à la chaleur transmise par la tige du thermomètre.

La chaleur reçue est en raison inverse du carré de la distance.

1245. En répétant l'expérience précédente avec des ballons de différents diamètres, on trouve que les variations thermométriques ne se font ni plus ni moins vite. Or quand le diamètre est double, la surface rayonnante est quadruple ; et il faut donc que la chaleur provenant de chaque point produise un effet quatre fois moindre sur le thermomètre ; de sorte que, si on représente par i la chaleur, qu'un point chaud rayonne sur l'unité de surface à l'unité de distance, $\frac{i}{d^2}$ sera la chaleur reçue à la distance d.

Influence de l'obliquité.

1246. La forme de l'appareil est également sans influence; ainsi au lieu d'un ballon sphérique, on peut prendre un vase cylindrique ou conique, sans que la vitesse d'échauffement soit changée; par conséquent dans les raisonnements relatifs à la chaleur rayonnante, on pourra toujours remplacer une enceinte irrégulière par une surface sphérique, également chaude et d'un rayon quelconque. Ce que nous disons de la totalité est évidemment vrai de chacune des parties, c'est-à-dire que le rayonnement d'un élément de surface est égal au rayonnement de sa projection, de sorte que par exemple le soleil qui nous présente un hémisphère, ne nous envoie pas plus de chaleur que s'il était réellement plat comme il paraît l'être; c'est l'obliquité des différentes parties qui établit la compensation.

Rayonnement des corps froids.

1247. Le même appareil sert à démontrer que les corps que nous appelons froids rayonnent encore. Plongeons le ballon dans un mélange réfrigérant, nous verrons le thermomètre baisser rapidement ; son refroidissement est évidemment dû à ce qu'il perd de la chaleur par le rayonnement et que les parois actuellement refroidies ne lui en envoient plus assez pour compenser ses pertes.

1248. Les variations d'un thermomètre placé ainsi dans une enceinte vide sont soumises à une loi très remarquable ; supposons qu'il y ait d'abord une différence de 15° entre la température de l'instrument et celle de l'enceinte, et qu'on ait observé dans la première minute un abaissement de 2° ; on ne trouvera plus qu'une variation de 1° quand la différence de température sera réduite à moitié ; et en général on verra que *la variation pendant un instant très court est proportionnelle à la différence de température au commencement de cet instant.* C'est en cela que consiste la loi de Newton ou plutôt de Richmann. Elle s'applique au cas de l'échauffement comme à celui du refroidissement; mais elle cesse d'être exacte quand les différences de température surpassent 30 ou 40°. Dans l'air elle est encore sensiblement vraie tant qu'il ne s'agit que de températures peu élevées. On peut s'en assurer en notant minute par minute l'abaissement d'un thermomètre préalablement échauffé et suspendu dans un espace où la température ne varie pas sensiblement. Ce que nous disons d'un thermomètre s'applique évidemment à un point matériel quelconque, et même à un corps entier, pourvu que tous ses points soient au même instant à la même température ; c'est par exemple le cas d'une masse liquide où les courants rétablissent continuellement l'uniformité.

Loi de Newton.

Cas où elle s'applique.

1249. Dans les limites où la loi de Newton est vraie les diverses substances ont en général une chaleur spécifique constante, c'est-à-dire qu'il leur faut la même quantité de chaleur pour varier de 1°, qu'elles soient à 0, à 10 ou à 20°, bien entendu que cette chaleur varie d'une substance à l'autre. D'après cela il est évident que la chaleur gagnée ou perdue est proportionnelle à la variation thermométrique, et que la loi de Newton revient à dire que *la chaleur gagnée ou perdue à chaque instant est proportionnelle à la différence de température.* Il est important de noter que cet énoncé suppose la température comptée sur le thermomètre à mercure, car l'uniformité de la chaleur spécifique ne s'observerait plus par exemple pour le thermomètre à alcool.

Autre énoncé de la loi.

Mesure de la chaleur rayonnante. 1250. La loi de Newton fournit un très bon moyen de mesurer la chaleur rayonnante. Supposons que dans une enceinte dont la température reste fixe on expose un thermomètre au rayonnement d'une source quelconque de chaleur, et qu'on observe une élévation de 4° *quand l'instrument est stationnaire*. Il est clair qu'alors la chaleur reçue est égale à la chaleur perdue ; mais celle-ci, d'après la loi, est proportionnelle à l'excès de température ; donc la chaleur reçue pourra être représentée par cet excès, c'est-à-dire par le nombre 4 ; de sorte que si, à une autre distance de la source, on n'obtient plus qu'une élévation de 1° *quand l'instrument est redevenu stationnaire*, on pourra conclure que la chaleur reçue dans ce dernier cas n'est que le quart de ce qu'on recevait dans le premier. On constate ainsi très bien que, dans l'air comme dans le vide (1248), la chaleur reçue est en raison inverse du carré de la distance. On peut aussi, en plaçant le thermomètre successivement à la même distance de deux sources différentes, une bougie par exemple et une lampe, comparer leur intensité, c'est-à-dire leur rayonnement calorifique. Il faut nécessairement se servir d'*un même thermomètre* dans chaque comparaison, car la loi de Newton, sur laquelle on se fonde, suppose que l'instrument placé dans les mêmes circonstances perdrait ou recevrait toujours la même quantité de chaleur.

Thermomètre différentiel de Leslie. Fig. 311. 1251. On doit à Leslie un thermomètre qui donne immédiatement les différences de température sans qu'on ait besoin de s'inquiéter de la température de l'enceinte. L'instrument se compose d'un tube recourbé terminé par deux boules pleines d'air ; le tube contient un liquide coloré qui sert d'index. Pour faire la graduation on écrit d'abord 0 vis-à-vis l'index quand les boules sont à la même température ; ensuite on établit entre elles une différence de 10° en plongeant l'une dans l'eau à 10°, tandis que l'autre est dans de la glace fondante. On marque de même les différences de 20 ou de 30°, puis, par approximation, on divise les intervalles en parties égales. Pour se servir de cet instrument, on expose l'une des boules à la chaleur rayon-

nante qu'on veut mesurer, en ayant soin de préserver l'autre avec un écran.

1252. On possède aujourd'hui un thermomètre différentiel bien préférable à celui de Leslie; mais comme il est fondé sur l'électricité, nous ne le décrirons qu'en traitant cette partie de la physique. Il est vrai que plusieurs des expériences dont nous allons parler ne se réalisent qu'avec cet instrument; mais on peut toujours les concevoir en imaginant un thermomètre différentiel d'une excessive sensibilité. Pour donner une idée de celle du *thermo multiplicateur*, nous dirons qu'il est affecté par la chaleur de la main placée à 25 ou 30 pieds, et que l'effet est instantané. — de Nobili ou thermomètre multiplicateur.

1253. Leslie a découvert que des surfaces égales, mais de nature différente, n'émettaient pas la même quantité de chaleur, bien qu'elles fussent à la même température. Prenons un vase cubique rempli d'eau bouillante, ayant une face couverte de noir de fumée, et une autre argentée et bien polie; si nous les tournons successivement vers un thermomètre, nous verrons que la face métallique émet beaucoup moins de chaleur que la face noircie. Si par exemple, avec le noir de fumée, on soutient le thermomètre différentiel à 10°, avec la face argentée on n'obtiendra que 0°,12. Bien entendu que l'eau est entretenue bouillante, ou du moins à la même température. On peut se servir pour cela d'une lampe à esprit-de-vin, en ayant soin d'interposer un écran entre elle et le thermomètre. Nous savons que les nombres obtenus quand l'instrument est stationnaire donnent la mesure de la chaleur reçue, qui est évidemment proportionnelle à la chaleur émise (1250). Pouvoir rayonnant. Fig. 334. Procédé pour la mesurer.

On conçoit donc qu'en appliquant différentes substances sur les faces du cube, on ait pu construire la table suivante où l'on a représenté par 100 le pouvoir rayonnant de la substance qui rayonne le plus.

Table des pouvoirs rayonnants.

Noir de fumée.	100
Carbonate de plomb.	100
Papier.	98

Colle de poisson	91
Verre	85
Encre de Chine	85
Gomme-laque	72
Surface métallique suivant le poli	12 à 15

Influence du poli.

1254. On voit que les métaux perdent par le rayonnement beaucoup moins de chaleur que les autres substances, surtout quand ils sont bien polis; en les rayant, on augmente sensiblement leur pouvoir émissif, et il est évident que cet effet ne peut pas être attribué à l'accroissement de surface (1246). Cependant tout ne dépend pas du poli, puisque le verre a un très grand pouvoir rayonnant. La transparence n'a aussi qu'une influence secondaire, puisque des substances opaques rayonnent autant ou plus que le verre. Il en est de même de la couleur; car le carbonate de plomb, qui est d'une blancheur parfaite, émet autant de chaleur que le noir de fumée. Un fait bien remarquable, c'est qu'une couche très mince de noir de fumée suffit pour porter à 100 le pouvoir rayonnant d'une surface quelconque, même métallique; de sorte que le rayonnement ne provient réellement que d'une couche très superficielle; cependant, pour certaines substances du moins, il dépend de l'épaisseur. Si on applique une couche très mince de colle à bouche ou de vernis à la gomme-laque sur une surface métallique, on augmente son pouvoir rayonnant; mais il faut un certain nombre de couches pour obtenir le maximum d'effet. Les rapports indiqués dans le tableau ont été déterminés pour des températures qui ne dépassent pas 100°; pour les températures plus élevées, il y a en général des variations. Cependant il résulte des expériences de M. Dulong que le noir de fumée et les métaux conservent le même rapport dans leurs pouvoirs rayonnants au moins jusqu'à 3 ou 400 degrés.

Influence de la transparence.

Influence de la couleur.

Influence de l'épaisseur.

Influence de la température.

Faible rayonnement des gaz.

1255. Le rayonnement des gaz est beaucoup plus faible que celui des solides et des liquides; si l'on cache la flamme d'une lampe à alcool par un écran, pour ne laisser à découvert que le large courant de gaz très chaud qui

s'élève au-dessus d'elle, le thermomètre le plus sensible, placé à une petite distance, donnera à peine quelques signes d'échauffement. La flamme qui n'est qu'un gaz incandescent rayonne, il est vrai, d'une manière assez marquée, mais aussi sa température est excessive; et encore son rayonnement est-il beaucoup plus faible que celui d'un corps solide présentant bien moins de surface, comme on peut s'en assurer en faisant rougir dans la flamme une spirale de fil de platine; l'effet thermométrique devient alors trois ou quatre fois plus grand.

1256. Les rayons de chaleur se réfléchissent comme les rayons de lumière; cela se démontre ordinairement au moyen de deux miroirs sphériques concaves, qu'on oppose l'un à l'autre à 6 ou 7 mètres de distance. Si on place une bougie sur l'axe commun en un certain point F qu'on trouve sans peine par tâtonnement, on voit se former en F′ à la même distance au-devant de l'autre miroir, une image renversée de la flamme, assez chaude pour produire un effet très sensible sur un thermomètre qu'on y plonge; un peu en dehors l'effet est nul. On démontre en optique que les rayons de lumière partis du point F se réfléchissent sur le premier miroir de manière à devenir parallèles à l'axe, et que le second miroir les fait converger en F′. Or, dans ces deux réflexions la chaleur accompagne la lumière puisqu'elle se concentre en F′; on peut donc dire qu'elle se réfléchit comme elle. Si on met au foyer F quelques charbons ardents, on pourra enflammer de la poudre ou de l'amadou au foyer conjugué F′. On aurait des effets semblables, mais moins marqués avec la chaleur obscure. Par exemple, dans une expérience de Pictet, un boulet de fer de 2 pouces refroidi jusqu'à l'obscurité a fait monter le thermomètre focal à 14°, 5 en 6′. La chambre était à 4°; les deux miroirs à 12 pieds. Un autre thermomètre placé à la même distance du boulet et de l'observateur n'était monté qu'à 6°. On voit que l'effet dû à la chaleur réfléchie était de 8,5. Avec un matras d'eau bouillante, on obtient une élévation de plus de 1°. Ces expériences ne réussissent bien qu'avec des miroirs métalliques.

Réflexion de la chaleur.
Fig. 344.

Réflexion apparente du froid. 1257. En remplaçant le corps chaud par de la glace ou par un mélange réfrigérant, on reconnaît qu'un thermomètre baisse en F' plus que partout ailleurs, à moins que ce ne soit très près de F. Pour concevoir ce phénomène supposons que la glace ne soit pas encore placée et que l'équilibre de température existe dans l'enceinte. Le thermomètre qui est en F' reçoit après deux réflexions tous les rayons qui, provenant des parois de l'enceinte, passent par le point F ; ces rayons sont nécessaires à sa température qui doit baisser quand on les arrête en mettant la glace en F. Si le thermomètre n'était pas en F' sa température dépendrait moins des rayons réfléchis; sa perte serait donc moindre par l'interposition de la glace. Quand on se sert de miroirs dépolis, le thermomètre en F' baisse à peine, parce que sa température alors dépend très peu de la réflexion.

Remarque. Il ne faudrait pas s'imaginer qu'il suffirait de dépolir les miroirs pour produire du froid, car par cela seul qu'on diminue la réflexion on augmente le rayonnement, et l'expérience prouve qu'il y a compensation parfaite.

Pouvoir réfléchissant. Fig. 345. 1258. Pour mesurer le pouvoir réfléchissant des diverses substances on en prépare des lames bien polies qu'on établit successivement sur un support S; en V, à une certaine distance, et un peu plus haut, on place un vase rempli d'eau bouillante; puis en P, sur la route du rayon réfléchi un thermo-multiplicateur, préservé du rayonnement direct par un écran F. On trouve ainsi que l'eau, les différents liquides, la faïence, les émaux, le marbre, le verre, etc., réfléchissent beaucoup moins de chaleur que les métaux; le noir de fumée n'en réfléchit pas sensiblement, et en général, pour avoir l'ordre des pouvoirs réfléchissants on n'a qu'à prendre l'ordre inverse des pouvoirs rayonnants (1253).

Influence de l'obliquité. 1259. On constate aisément, en faisant tomber la chaleur plus ou moins obliquement sur une même substance, que l'intensité des rayons réfléchis augmente avec l'obliquité, de sorte que c'est près de l'incidence perpendiculaire que la réflexion est la plus faible. Cependant,

M. Melloni a trouvé que la proportion de lumière réfléchie restait sensiblement la même tant que l'angle d'incidence, compté de la normale, ne dépassait pas 25 ou 30°.

1260. Dans ces limites la chaleur réfléchie forme à très peu près un quatre-centième de la chaleur incidente sur la première surface de toutes les substances que la chaleur peut traverser; quant aux autres la proportion est plus forte; pour le cuivre jaune, par exemple, elle s'élève à plus de 0,44; et elle est à très peu près de même pour tous les métaux bien polis. Les résultats que nous venons d'indiquer se vérifient non-seulement pour la chaleur de l'eau bouillante, mais pour celle provenant de toute autre source, de sorte que le pouvoir réfléchissant ne présente pas les variations que nous allons trouver dans les pouvoirs transmissif et absorbant. Rapport entre la chaleur incidente et la chaleur réfléchie.

1261. Les substances transparentes se laissent en général traverser instantanément par la chaleur comme par la lumière. Cela est évident pour la chaleur du soleil, qui passe comme on sait très bien à travers les vitres et qu'on peut concentrer comme la lumière avec les lentilles ou verres brûlants. Mais cela est encore facile à vérifier pour la chaleur artificielle, même quand elle est complétement obscure. Qu'on mette sur une même ligne une lampe ou un vase rempli de mercure bouillant, un écran opaque, une lame de verre et un thermo-multiplicateur. On verra ce dernier instrument marcher à l'instant même où on enlèvera l'écran. L'effet sera si prompt qu'on ne pourra pas l'attribuer à l'échauffement de la lame de verre; d'ailleurs en la couvrant d'une couche d'encre de Chine tout est arrêté, et cependant un pareil enduit, si la lame s'échauffait, ne ferait qu'augmenter son rayonnement vers le thermomètre. M. Melloni s'est ainsi assuré que la chaleur rayonnante traversait instantanément des morceaux de cristal de roche de 5 à 6 pouces d'épaisseur. Transmission de la chaleur rayonnante.

1262. L'appareil de M. Melloni pour les expériences sur la transmission de la chaleur rayonnante se compose 1° du thermo-multiplicateur P; 2° d'un support S sur lequel on pose la substance que la chaleur doit traverser; Appareil pour les expériences. Fig. 342.

3° d'une source de chaleur variable; ici c'est une lampe L à alcool et à spirale de platine T; 4° d'un écran E' percé d'un trou O; cet écran ne laisse passer qu'un faisceau déterminé de rayons. L'écran E' s'enlève au moment où l'on fait l'expérience. Quant à l'écran E on l'emploie pour que tout soit pareil vis-à-vis les deux faces du thermo-multiplicateur; et même M. Melloni enferme maintenant l'instrument dans une enceinte en fer-blanc, parfaitement close, afin que la température soit plus uniforme. Il y a seulement une ouverture qu'on gradue à volonté par des diaphragmes. L'écran E devient alors inutile. La coulisse RR' permet d'établir les écrans et les supports aux distances convenables.

Diathermanéité.

1263. On appelle *diathermanes* les substances qui transmettent la chaleur rayonnante, de même qu'on appelle *diaphanes* celles qui transmettent la lumière. Il est à remarquer que les substances les plus diaphanes ne sont pas toujours les plus diathermanes; l'eau la plus limpide laisse passer moins de chaleur que l'huile; un morceau d'alun aussi transparent que du cristal est moins diathermane qu'une lame de tourmaline, malgré sa teinte verte foncée. Il existe du cristal de roche qui a naturellement une teinte brune et qu'on appelle *enfumé* pour cette raison. M. Melloni a reconnu qu'un morceau de ce cristal ayant 100 millimètres d'épaisseur transmettait encore plus de la moitié de la chaleur d'une lampe d'Argant, tandis qu'une lame d'alun d'une transparence parfaite d'un millimètre d'épaisseur seulement, n'en laissait passer que les dix-sept centièmes. Enfin il est des substances entièrement opaques qui sont cependant diathermanes; tel est le verre noir; à égalité d'épaisseur il laisse même passer plus de chaleur que l'alun le plus limpide. Parmi les corps solides on ne peut citer que le *sel gemme* qui approche de la diathermanéité parfaite; l'alun, l'eau et les substances opaques en général sont au contraire, très peu diathermanes.

Séparation de la chaleur

1264. Avec des substances transparentes *athermanes*, M. Melloni est parvenu à priver complétement la lumière

du soleil de sa chaleur. Cette lumière, il est vrai, était un peu affaiblie par l'imperfection de la transparence, mais en la concentrant par des lentilles, on pouvait l'obtenir aussi vive qu'on le voulait sans qu'il se manifestât de chaleur appréciable. Des expériences sur la lumière artificielle ont donné le même résultat. Ainsi lors même que les rayons de chaleur et de lumière se trouvent réunis, on ne doit pas les confondre. La nature d'ailleurs nous les présente souvent séparés. La lumière de la lune est sans chaleur sensible; concentrée par les plus fortes lentilles, elle ne fait pas monter le thermomètre d'un centième de degré. D'un autre côté les corps donnent de la chaleur sans lumière tant que leur température ne dépasse pas 4 ou 500°. Nous reviendrons en optique sur cette distinction des rayons de chaleur et des rayons de lumière, et nous verrons encore d'autres moyens de les séparer. et de la lumière.

1265. Les rayons de chaleur peuvent différer non-seulement par l'intensité, mais par beaucoup d'autres qualités, ainsi que nous le ferons voir en optique. Ici nous signalerons seulement la *diathermansie*, qualité en vertu de laquelle certains rayons passent plus facilement que d'autres à travers un milieu donné. Qu'on expose successivement une même lame de verre à des rayons d'égale intensité provenant de sources différentes, on aura des faisceaux transmis d'intensité très diverse. L'inégale diathermansie doit être admise aussi dans les rayons provenant d'une même source; car puisque le verre laisse passer certains rayons plutôt que d'autres, il est naturel d'attribuer au moins en partie l'affaiblissement de chaque faisceau dans l'expérience précédente, à ce qu'il est composé de rayons doués d'une diathermansie inégale. Cette manière de voir se trouve d'ailleurs confirmée par tous les faits connus. **Hétérogénéité de la chaleur. Diathermansie.**

1266. Nous avons pris le verre pour exemple, mais on trouverait de même que les autres substances diathermanes laissent passer certains rayons de préférence. En général les rayons qui passent plus facilement que d'autres à travers une substance, passent aussi plus facilement à travers une autre; mais il y a des exceptions, de sorte qu'il faut ad- **Pouvoir diathermique.**

mettre dans chaque milieu diathermane un pouvoir *diathermique* propre. On peut juger du pouvoir diathermique ou transmissif des différentes substances en les exposant successivement au rayonnement d'une même source et en mesurant la chaleur transmise. Mais comme celle-ci dépend non-seulement du pouvoir diathermique des milieux, mais aussi de la diathermansie des rayons, on doit s'attendre à trouver des proportions différentes et même un ordre différent si on opère avec différentes sources ou sur de la chaleur ayant déjà traversé certains milieux; on trouverait par exemple que le verre et le cristal de roche, en lames de 7 à 8 millimètres, transmettent sans perte la chaleur qui a traversé une couche d'eau de 1 à 2 millimètres, ou une lame d'alun de même épaisseur, tandis qu'il y a une perte énorme dans la plupart des autres cas.

Expériences sur le pouvoir diathermique et la diathermansie.

1267. Pour donner une idée du pouvoir diathermique des divers milieux et de la diathermansie des rayons provenant de différentes sources, nous rapporterons les résultats d'une belle série d'expériences faites par M. Melloni. Les sources de chaleur sur lesquelles il a opéré étaient : 1° une lampe de Locatelli, c'est une petite lampe sans verre, à simple courant d'air; 2° une spirale de fil de platine maintenue à l'état d'incandescence au-dessus d'une lampe à esprit-de-vin; 3° une lampe à alcool couverte par une lame de cuivre noirci, qui prenait une température fixe de 390°, comme on s'en est assuré par la méthode des mélanges (1143); 4° un vase en cuivre mince noirci à l'extérieur et rempli d'eau maintenue en ébullition. Des écrans convenablement disposés permettaient d'opérer sur un faisceau de rayons bien déterminé. Les quatre sources étaient d'ailleurs placées successivement à des distances convenables pour produire toutes le même effet sur le thermo-multiplicateur avant l'interposition de la substance à essayer.

1268. *Pouvoir diathermique des solides.*

NOMS des substances interposées. (*Épaisseur commune* 2mm,6).	TRANSMISSION sur une quantité de chaleur représentée par 100 et provenant			
	de la lampe de Locatelli.	du platine incandescent.	du cuivre noirci chauffé à 390°.	du cuivre noirci chauffé à 100°.
Sel gemme (incolore).	92	92	92	92
Chaux fluatée (incolore).	78	69	42	33
Sel gemme (louche).	65	65	65	65
Chaux fluatée (verdâtre).	46	38	24	20
Spath d'Islande (incolore).	39	28	6	0
Verre de glace (incolore).	39	24	6	0
Cristal de roche (incolore).	38	28	6	0
Cristal de roche enfumé.	37	28	6	0
Bichromate de potasse (orangé).	34	28	15	0
Carbonate de plomb (incolore).	32	23	4	0
Agate blanche (translucide).	23	11	2	0
Ambre artificiel (jaune).	21	5	0	0
Tourmaline verte (vert foncé).	18	16	3	0
Corne de bœuf (translucide).	18	4	0	0
Gomme commune (jaunâtre).	18	3	0	0
Chaux sulfatée (incolore).	14	5	0	0
Ambre naturel.	11	5	0	0
Alun (diaphane, incolore).	9	2	0	0
Sucre candi (incolore).	8	0	0	0
Glace très pure.	6	0	0	0

1269. On voit que le verre qui transmet plus du tiers de la chaleur d'une lampe ne livre passage qu'au quart de celle qui provient de platine incandescent ; la proportion est encore moindre quand la source est obscure ; plusieurs substances diathermanes deviennent alors sensiblement athermanes ; c'est ce qui a lieu pour le sulfate de chaux doué cependant de la transparence la plus parfaite. Enfin la transmission est à peu près nulle pour presque tous les corps quand il s'agit de la chaleur de l'eau bouillante. En général Remarques.

la perte est d'autant moindre que la température de la source est plus élevée. Quand il y a incandescence, c'est-à-dire quand les rayons de lumière accompagnent les rayons de chaleur, ceux-ci jouissent d'une grande diathermansie, qu'on peut en quelque sorte mesurer par la vivacité de la lumière. Aussi les rayons du soleil traversent-ils les substances les moins diathermanes; avec la glace elle-même on fait de véritables verres brûlants.

Le sel gemme est tout-à-fait hors ligne parmi les substances diathermanes; il transmet toujours la même proportion de chaleur; avec une flamme brillante ou simplement avec de l'eau à 40 ou 50°, une lame de 2mm,62 d'épaisseur transmet toujours les 92 centièmes de la chaleur incidente.

M. Melloni a constaté que les verres colorés n'ont pas sur la chaleur rayonnante d'action qui paraisse dépendre de la couleur; il a remarqué seulement la très faible diathermansie du verre noir et du verre coloré par de l'oxide de cuivre en vert bleuâtre. C'est avec ce dernier verre et une certaine épaisseur d'eau qu'il a arrêté complètement la chaleur des rayons solaires.

Pouvoir diathermique des liquides.

1270. Pour mesurer le pouvoir transmissif des liquides M. Melloni s'est servi d'une auge de verre ayant en dedans 9mm 2 de largeur; la source était une lampe d'Argant, munie de sa cheminée de verre. En représentant par 100 la chaleur transmise, quand l'auge était vide, on a eu avec

Le carbure de soufre	63
L'huile d'olive	30
L'éther sulfurique	21
L'acide sulfurique	17
L'alcool	15
L'eau	11

On voit que l'eau, soit à l'état solide, soit à l'état liquide, transmet très mal la chaleur rayonnante.

Pouvoir diathermique des gaz.

1271. Quant aux gaz, on n'a pas encore d'expériences comparatives, mais on sait que l'air transmet très bien la

chaleur, puisque tous les phénomènes de la chaleur rayonnante ont lieu dans ce fluide.

1272. On conçoit sans peine que la chaleur transmise diminue à mesure que l'épaisseur augmente, mais un fait bien remarquable observé d'abord par Delaroche et vérifié depuis par M. Melloni, c'est que la perte due à l'épaisseur va toujours en diminuant ; si la chaleur rayonnante a été réduite à moitié en traversant une certaine épaisseur, ce qui reste n'éprouve pas à beaucoup près une perte de moitié en traversant une épaisseur pareille. C'est une conséquence évidente de l'hétérogénéité de la chaleur et de ce que les substances diathermanes font un véritable triage parmi les rayons. Ceux qui ont pu traverser une certaine épaisseur jouissent évidemment d'une plus grande diathermansie que les autres ; il n'est donc pas étonnant qu'ils éprouvent proportionnellement moins de perte dans les traversées ultérieures.

Influence de l'épaisseur sur la transmission.

1273. La chaleur qui vient frapper un corps se divise en général en trois parties, une qui se réfléchit, une qui est transmise, et une troisième qui est absorbée comme le prouve l'imperfection de la diathermanéité. C'est parce qu'elle est ainsi absorbée que la chaleur rayonnante produit l'échauffement, qui n'est évidemment dû ni à la chaleur réfléchie ni à la chaleur transmise.

Absorption de la chaleur rayonnante.

1274. On n'a bien mesuré jusqu'à présent le pouvoir absorbant que pour les substances athermanes ; tels sont les métaux, le noir de fumée, etc. Par des expériences très précises M. Dulong a reconnu que pour ces substances le pouvoir absorbant était égal au pouvoir rayonnant (1253). M. Melloni est parvenu à la même loi par un procédé moins rigoureux, mais sensiblement exact, comme le prouve l'accord même des résultats. Il se sert d'un écran métallique très mince, dont une face tournée vers la source de chaleur est recouverte de la substance qu'on veut essayer, tandis que l'autre, enduite de noir de fumée, pour qu'elle ait un grand pouvoir rayonnant, regarde le thermomètre placé à une petite distance. *En admettant que le rayonnement de cette face est proportionnel à la chaleur absorbée*

Pouvoir absorbant.

Il est égal au pouvoir rayonnant.

par l'autre et en opérant avec la chaleur de l'eau bouillante, on retombe précisément sur les nombres qui représentent les pouvoirs rayonnants déterminés à la même température.

Influence de la source de la chaleur.

1275. Comme les substances essayées sont sensiblement athermanes pour la chaleur de l'eau bouillante, l'écran métallique ne s'échauffe que par la chaleur absorbée et nullement par la chaleur transmise jusqu'au noir de fumée; il n'en est plus de même quand on opère avec une source d'une température très élevée, le phénomène alors devient complexe et l'on observe des variations analogues à celles que nous avons constatées dans les pouvoirs transmissifs, en employant la chaleur de différentes sources. Quoi qu'il en soit, voici les résultats obtenus dans ce cas par M. Melloni :

	Platine incandescent.	*Cuivre à 400°.*	*Cuivre à 100°.*
Noir de fumée	100	100	100
Carbonate de plomb	56	89	100
Colle de poisson	54	64	91
Encre de Chine	95	87	85
Gomme laque	47	70	72
Surface métallique	13,5	13	13

On voit que la température de la source n'a pas d'influence sensible sur les pouvoirs absorbants des métaux.

Pouvoir absorbant des couleurs.

1276. Les diverses couleurs n'ont pas d'action particulière sur la chaleur obscure, mais elles absorbent très inégalement la chaleur solaire; ainsi un morceau de drap noir, mis au soleil sur la neige, en fait fondre bien plus qu'un morceau de drap blanc; on peut conclure de là que les vêtements blancs sont préférables en été et les noirs en hiver; s'il n'y a de différence que dans la couleur, leur pouvoir rayonnant est le même puisque la chaleur du corps est bien au-dessous de 100° (1054).

Réfraction, dispersion, polarisation de la chaleur.

1277. Nous venons de voir que la chaleur se réfléchissait sur les corps et les traversait instantanément comme la lumière; l'expérience si connue des verres ardents,

qu'on peut répéter sur la chaleur obscure avec une lentille de sel gemme ; établit le fait de la *réfraction; la dispersion*, *la polarisation*, ont aussi été constatées, mais nous n'examinerons ces modifications dans la chaleur qu'après les avoir étudiées dans la lumière.

CHAPITRE IX.

ÉCHAUFFEMENT ET REFROIDISSEMENT.

---

§ I. *Marche générale de l'échauffement et du refroidissement.*

1278. Le refroidissement d'un corps se fait en général à la fois par le contact de l'air et par le rayonnement, dont les effets varient suivant mille circonstances, de sorte que le phénomène est extrêmement compliqué. Cependant nous avons déjà une idée de sa marche par des expériences journalières; ainsi nous savons qu'un corps fortement chauffé perd d'abord en très peu de temps une très grande quantité de chaleur; que son refroidissement se fait ensuite d'une manière bien plus lente ; de sorte que si dans la première minute sa température a baissé de 40°, par exemple, il arrive un moment où elle ne baisse pas même d'un degré par minute. Les pertes diminuant ainsi continuellement, le corps finit par ne plus donner qu'une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'il reçoit des corps environnants; alors sa température est stationnaire en vertu d'une espèce d'équilibre qu'on peut appeler mobile, car il est évident que le rayonnement continue de part et d'autre. *Marche du refroidissement en général.* *Vitesse décroissante.* *Température stationnaire.*

1279. De ce fait que la perte de chaleur est plus grande quand l'excès de température est plus grand, on conclut qu'un corps soumis à l'action d'une source constante de *Mêmes phénomènes pour l'échauffement.*

chaleur ne peut pas s'échauffer indéfiniment, et qu'il doit arriver un moment où la chaleur perdue est égale à la chaleur reçue. En effet, on sait qu'un corps froid transporté dans un lieu, à 20° par exemple, ne peut pas s'échauffer à plus de 20°, et qu'un thermomètre placé au soleil n'acquiert qu'un excès déterminé de température. On conçoit très bien aussi que l'échauffement doive devenir de plus en plus lent à mesure qu'on approche de la température limite.

Variations de température pendant un temps donné.

1280. Avec la loi de Newton (1248) on calcule aisément à quoi se réduit au bout d'un temps donné la différence entre la température du thermomètre et du lieu où il est placé. En effet, d'après la loi, l'instrument perd à chaque instant une fraction constante de sa différence de température au commencement de cet instant; d'où il suit que les différences décroissent en progression géométrique. Ainsi dans l'exemple du n° cité la différence qui était d'abord 15°, devient $15 - 15\,\frac{2}{15}$, ou $15\,(\frac{13}{15})$, à la fin de la première minute; $15\,(\frac{13}{15})^2$ à la fin de la 2°, $15\,(\frac{13}{15})^3$ à la fin de la 3°, etc.; de sorte que si on représente par a la différence initiale, par θ la différence après n minutes écoulées, et par q la raison de la progression, on a

Formule générale.

$$\theta = a\,q^n$$

Par exemple, au bout d'une demi-heure, la différence est réduite à $\frac{1}{4}$ de degré environ; on voit qu'elle ne devient mathématiquement nulle qu'au bout d'un temps infini; mais bientôt elle cesse d'être appréciable.

Un corps met le même temps à s'échauffer qu'à se refroidir.

1281. On peut répéter le même raisonnement pour le cas où la température du thermomètre est au-dessous de celle de l'enceinte; et on retombe sur la même formule. Il s'ensuit que l'instrument met précisément le même temps à se réchauffer qu'à se refroidir d'un même nombre de degrés. Si par exemple on le met à 6° dans une enceinte à 21°, au bout d'une demi-heure il marquera $20°\,\frac{3}{4}$; si au contraire on l'avait mis dans un espace à 9° au-dessous de zéro, ce qui eût toujours donné la même différence absolue de 15°, sa température, au bout d'une demi-heure, eût été de $-8°\,\frac{3}{4}$. Les expériences de ce genre réussis-

sent encore mieux dans le vide, où nous savons que la loi de Newton est plus exacte. Elles fournissent alors la meilleure preuve de l'égalité du pouvoir absorbant et du pouvoir rayonnant.

1282. Il est évident que les nombres que nous venons d'indiquer ici se rapportent qu'au thermomètre pris pour exemple; pour un autre on aurait, en général, une autre raison dans la progression. Il est important d'observer qu'en prenant, outre la différence initiale a, une différence θ, après un certain nombre de minutes, on peut calculer q, par la formule même, qui se trouve alors plus exacte que si on avait pris la différence après une minute seulement. Remarques.

1283. On peut encore, à l'aide de la loi de Newton, calculer la température à laquelle doit s'arrêter un thermomètre exposé au soleil ou en général à une cause quelconque d'échauffement ou de refroidissement qui ne varie pas d'une manière brusque. Supposons que le thermomètre soit monté en 2' de 3° et de 5° en 4'. La différence initiale a entre la température finale et celle qu'avait d'abord le thermomètre, est inconnue, mais on sait qu'aux époques 2' et 4', depuis le commencement de l'observation, la différence variable θ était $a-3$ et $a-5$, de sorte qu'on a les deux équations, Calcul de la limite.

$$a-3=aq^2,\ a-5=aq^4 \text{ d'où } a=9$$

C'est-à-dire que si le thermomètre était d'abord à 10° il s'arrêtera à 19°.

1284. Pour savoir combien il mettra de temps à atteindre la température limite, supposons qu'il ne puisse pas donner les dixièmes de degré; il nous paraîtra stationnaire dès que la différence θ ne sera plus que d'un dixième; or les opérations précédentes donnent $q=\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{1}{2}}$, de sorte qu'on a par la formule générale, Temps nécessaire pour l'atteindre.

$$0{,}1=9\left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{n}{2}} \text{ d'où } n=21$$

Chaleur perdue ou gagnée dans un temps donné.

1285. D'après les chaleurs spécifiques et les poids du mercure et du verre qui composent un thermomètre, on calcule aisément la chaleur nécessaire pour faire varier sa température de 1°; mais pour simplifier le raisonnement, nous supposerons qu'il faille pour cela précisément une unité de chaleur; alors la perte pendant un intervalle de temps déterminé sera représentée par la variation même de température, qu'on connaîtra par l'observation ou par le calcul. Ainsi dans l'exemple que nous avons pris on trouve qu'à la fin de la première seconde la différence

$$\theta = 15\left(\frac{13}{15}\right)^{\frac{1}{60}} = 14°,9673$$

D'où il suit que la perte est de 0,0357 d'unité de chaleur.

Cas où la température est stationnaire.

1286. Quand la température est stationnaire on obtient très approximativement la perte pendant un temps donné en la calculant pour 1' comme si le thermomètre baissait réellement, et en multipliant le résultat par le nombre de secondes écoulées. Ici, par exemple, on obtient 21,42, pour le cas où le thermomètre est resté stationnaire à 15° pendant 10 minutes. Un calcul plus élevé montre que, d'après la loi de Newton, si on désigne par v la perte pendant l'unité de temps lorsque la température est stationnaire, on a

$$v = 2,303\,\theta \log. q = 2,303 \times 15 \log. \tfrac{13}{15} = 2,1424.$$

Et par conséquent 21,424 unités de chaleur pour 10'.

Nous avons pris un thermomètre pour exemple, mais on raisonnerait de même sur tout autre corps auquel la loi de Newton serait applicable; par exemple, si une masse liquide m, où les courants rétablissent continuellement l'uniformité de température, a été maintenue pendant un temps t avec un excès constant θ sur l'air environnant, la

chaleur reçue, qui dans ce cas est nécessairement égale à la chaleur perdue, sera

$$2,303\ \theta\ m\ t \log q.$$

q, qui est la raison relative à l'unité de temps que l'on adopte, se détermine par les variations de température observées avant ou après l'état stationnaire.

§ II. *Influence de la chaleur spécifique et de la chaleur latente.*

1287. Il est évident que les corps doués d'une grande chaleur spécifique doivent mettre plus de temps que les autres à se refroidir et à s'échauffer. L'eau sous ce rapport est particulièrement remarquable, et on met continuellement à profit cette propriété qu'elle a de conserver longtemps sa température. On conçoit aussi qu'à cause de sa chaleur latente 1_k de vapeur d'eau, en se liquéfiant peu à peu, doit maintenir chauds pendant très longtemps les tuyaux des calorifères (1200). Pour tomber à zéro il y a 643 unités de chaleur à dégager (1195) et arrivé là il faut qu'il en perde encore 75 avant de passer entièrement à l'état de glace (1190). Cette influence est surtout remarquable pour l'eau.

1288. Toutes choses égales, le temps qu'un corps met à se refroidir de 1° est proportionnel à sa chaleur spécifique; c'est une conséquence de la loi de Newton, mais nous prendrons ce fait comme un résultat d'expérience; on peut en effet s'assurer que dans des circonstances identiques 1^k d'eau met trente fois autant de temps que 1^k de mercure à se refroidir d'un même nombre de degrés. Il résulte de là, pour comparer les chaleurs spécifiques, une méthode qui a fourni des résultats très exacts à MM. Dulong et Petit. Les diverses substances étaient successivement enfermées dans un même vase assez petit pour que la masse eût tous ses points toujours à la même température. Ce vase était suspendu dans un autre beaucoup plus grand, entouré de glace de toute part et formant ainsi une enceinte dont la température était parfaitement Méthode du refroidissement pour mesurer la chaleur spécifique.

fixe. On faisait le vide dans cette enceinte pour que le refroidissement marchât plus lentement. Une ouverture mastiquée laissait passer la tige d'un thermomètre plongé dans la substance, qui était préalablement échauffée jusqu'à 20 ou 30°. On observait la durée du refroidissement, à partir du moment où l'excès de température était seulement de 10°, cas où la loi de Newton est très exacte. On tenait d'ailleurs compte de la chaleur fournie par le petit vase et par le thermomètre.

Méthode du refroidissement pour mesurer la chaleur latente.

1289. M. Rudberg s'est servi de la méthode du refroidissement pour mesurer approximativement la chaleur latente. Nous donnerons seulement quelques résultats qui mettent bien en évidence l'énorme quantité de chaleur dégagée pendant la solidification.

Durée du refroidissement d'une masse de plomb fondu.

De 340 à 330°	....	12″	
330	320	171″	Solidification dans l'intervalle.
320	310	16″,5	

Durée du refroidissement d'une masse d'étain fondu.

De 240 à 230°	....	23″	
230	220	560″	Solidification dans l'intervalle.
220	210	33″	

— pour étudier la composition de certains corps.

1290. En appliquant cette méthode d'observation à différents alliages, M. Rudberg a reconnu pour quelques-uns plusieurs points où la température restait ainsi stationnaire ; cela montre que ces alliages, en apparence homogènes, se composaient réellement chacun de plusieurs alliages en proportions différentes, se solidifiant à différentes températures ; de sorte que le refroidissement devient dans ce cas une méthode d'analyse chimique, qui montre que la loi des proportions définies s'observe dans des cas où on le croyait en défaut.

§ III. *Influence de la conductibilité.*

1291. La conductibilité joue évidemment un très grand rôle dans les phénomènes de l'échauffement et du refroidissement; mais pour bien concevoir ce rôle il est bon de remonter à la cause même de la conductibilité, et c'est ce que nous pouvons faire à présent que nous nous sommes élevés à l'idée de la chaleur rayonnante. Rappelons-nous que les dernières particules des corps sont tenues en équilibre à distance par certaines forces, de sorte qu'elles ne se touchent réellement pas. D'après cela il doit y avoir un rayonnement entre elles comme entre de petits corps isolés; la conductibilité et la transmission de la chaleur au contact rentrent ainsi dans le fait général du rayonnement.

Rayonnement particulaire.

1292. En partant de l'hypothèse que le rayonnement de particule à particule, se fait suivant la loi de Newton, on arrive à des résultats qui s'accordent très bien avec l'expérience, du moins dans de certaines limites. Considérons par exemple une barre métallique dont une extrémité soit en rapport avec une source constante de chaleur, en plongeant dans un foyer, ou mieux en recevant la flamme d'une lampe à niveau constant. D'après la loi, chaque tranche transmet à la tranche suivante une quantité de chaleur proportionnelle à la différence de température. S'il n'y avait aucune perte par le contact de l'air et par le rayonnement extérieur, la barre finirait par acquérir dans toute sa longueur une température uniforme et égale à celle de la source; mais à cause du refroidissement il s'établit un état stationnaire avec des températures décroissantes. Par un calcul fondé sur la loi de Newton, on trouve qu'à 1, 2, 3 décimètres de la source les excès des différentes tranches de la barre sur la température ambiante doivent décroître suivant une progression géométrique quand l'équilibre est établi. Or, des expériences très exactes, notamment celles de M. Despretz, ont confirmé ce résultat du calcul, du moins pour les métaux bons conducteurs. La raison de la progression dépend évidemment de la conductibilité; aussi

Il suit la loi de Newton dans de certaines limites.

Loi des températures d'une barre chauffée par un bout.

celles des différentes substances (1230) a-t-elle été déduite d'expériences de ce genre à l'aide du calcul.

Loi des températures dans une enveloppe.

1293. On conclut encore de la loi de Newton, appliquée au rayonnement particulaire, que dans l'appareil que nous avons indiqué pour la mesure directe de la conductibilité (1230) les températures des couches à des distances égales suivent une progression arithmétique ; c'est-à-dire que si l'épaisseur totale est d'un centimètre, on aura 1° de différence à chaque dixième de millimètre d'épaisseur. En effet, les différentes tranches d'une enveloppe ainsi complète ne se refroidissent ni par l'air ni par le rayonnement extérieur ; quand l'équilibre est établi, toute la chaleur que reçoit l'une doit passer dans l'autre, ce qui exige, d'après la loi, une *même différence* de température entre deux tranches successives quelconques.

Comment les enveloppes empêchent le refroidissement.

1294. On rentre à peu près dans le cas précédent quand on applique une enveloppe sur un corps chaud placé dans un espace froid; et il est facile d'après cela de concevoir pourquoi le refroidissement devient alors quelquefois si lent. Lorsque l'équilibre est établi, la température des couches successives va toujours en décroissant du dedans en dehors, quoiqu'une égale quantité de chaleur les traverse toutes; c'est ce que nous venons de voir. Maintenant, si l'enveloppe conduit mal la chaleur, ou si elle est un peu épaisse, sa surface extérieure se trouvera presque aussi froide que l'air ambiant, quoique l'intérieure puisse être très chaude; alors la perte de chaleur sera presque nulle, car d'après la loi de Newton, elle est proportionnelle à la différence de température.

Applications.

1295. On conçoit très bien d'après cela de quelle manière les vêtements agissent pour préserver du froid; les plus chauds sont précisément ceux dont la surface extérieure se maintient la plus froide. C'est par exemple le cas de la fourrure qui se trouve ordinairement en dehors à la même température que l'air. On explique de même l'effet des enveloppes de paille pour préserver les arbustes de la gelée, l'utilité des matériaux peu conducteurs employés dans la construction des fourneaux, etc.

1296. Quoique l'air soit un très mauvais conducteur et que sa chaleur spécifique soit très petite, il refroidit les corps assez rapidement parce qu'il s'élève dès qu'il est échauffé et qu'il s'établit ainsi un courant continuel. La vitesse du refroidissement dépend de la facilité avec laquelle l'air se renouvelle autour de la surface; aussi varie-t-elle avec la forme du corps, sa position, et les circonstances extérieures. On a constaté qu'il se condensait plus de vapeur dans les tuyaux verticaux des calorifères que dans les tuyaux horizontaux; cela prouve que l'air enlève plus de chaleur aux premiers, et cela se conçoit parce que les courants se meuvent plus facilement tout autour de leur surface, tandis que pour les autres le renouvellement de l'air n'est facile que par la partie inférieure, qu'on trouve en effet moins chaude que la supérieure.

Echauffement et refroidissement par les gaz.

§ IV. *Influence des pouvoirs absorbant, rayonnant, réfléchissant et diathermique.*

1297. Les corps exposés à la chaleur rayonnante s'échauffent plus ou moins vite, suivant le pouvoir absorbant de leur surface; ainsi l'eau mise devant le feu dans un vase d'argent poli s'échauffe bien plus lentement que quand la surface est noircie; en revanche elle se refroidit moins vite.

Influence sur la vitesse d'échauffement.

Les miroirs ardents, à cause de leur grand pouvoir réfléchissant, ne prennent qu'à la longue une certaine élévation de température. Dans les expériences faites avec de grandes lentilles, Tschirnhausen avait observé que les matières noires s'échauffaient plus vite que les matières blanches; il avait aussi remarqué l'influence du pouvoir transmissif; que par exemple l'eau trouble entrait plus vite en ébullition que l'eau claire, et qu'en général les substances opaques s'échauffaient plus promptement que les substances transparentes. Macquer a même vu que des feuilles de verre très minces ne fondaient pas au foyer de la grande lentille de *Trudaine*; on ne pouvait pas y enflammer l'esprit-de-vin, et l'air ne s'y échauffait pas assez pour qu'on observât

un courant ascendant comme au-dessus d'une bougie. Il est évident d'après cela qu'un thermomètre à air à boule transparente serait un très mauvais instrument pour juger de la chaleur du soleil.

Influence sur la limite d'échauffement.

1298. Non-seulement les corps doués d'un grand pouvoir absorbant s'échauffent plus vite, mais ils s'échauffent aussi davantage. Qu'on expose au soleil un thermomètre différentiel ayant une de ses boules argentée et l'autre noircie; on verra que celle-ci finit par prendre une température plus élevée.

Dans le vide toutes les surfaces s'échaufferaient également.

1299. Il est à remarquer que cette différence n'aurait pas lieu dans le vide; tous les corps exposés à la chaleur rayonnante y prendraient la même température, quel que fût leur pouvoir absorbant, *toutes choses égales d'ailleurs;* car si l'un gagne deux fois autant de chaleur parce que son pouvoir absorbant est double, il en perd deux fois autant puisque son pouvoir rayonnant est double aussi (1274). L'égalité de température, si elle existe un instant, devra donc subsister.

Relation entre les pouvoirs rayonnants et les températures finales dans l'air.

1300. Mais dans l'air il y a une autre perte que celle due au rayonnement; et, chose remarquable, l'inégalité de température s'établit quoique le fluide enlève la même quantité de chaleur à égalité de température (1323). En effet, supposons les deux corps arrivés à un état stationnaire; soient, pour un degré d'excès, c la chaleur enlevée par le contact de l'air, r et r' les pertes par le rayonnement; la perte totale à la température t sera, d'après la loi de Newton, $(c+r)\,t$ pour l'un des corps et $(c+r')\,t'$ pour l'autre. Nous mettons t' parce que nous ne savons pas d'avance si les températures sont les mêmes. Puisqu'il y a équilibre, les pertes sont égales aux chaleurs reçues; mais celles-ci sont proportionnelles aux pouvoirs absorbants qui sont égaux aux pouvoirs rayonnants, de sorte qu'en définitive il y a proportionnalité entre les pertes par rayonnement et les chaleurs reçues; on a donc

$$\frac{r}{r'} = \frac{(r+c)\,t.}{(r'+c)\,t'.}$$

ce qui suppose t différent de t', tant que c n'est pas nul,

c'est-à-dire tant qu'on n'est pas dans le vide; dans le vide on a nécessairement $t' = t$.

1301. Le pouvoir diathermique du verre étant bien plus grand pour la chaleur lumineuse que pour la chaleur obscure, les rayons du soleil traversent plus aisément les vitres d'un appartement que ne peuvent le faire les rayons obscurs provenant des corps qu'ils ont échauffés; aussi remarque-t-on que la chaleur se concentre, et cela contribue à l'avantage des doubles fenêtres. En faisant tomber les rayons du soleil dans le fond d'une boîte noircie à travers trois vitres distantes de quelques centimètres, Saussure a obtenu une élévation de température de plus de 100°. La superposition des enveloppes contribue d'ailleurs pour beaucoup au phénomène (1294). Influence de la diathermansie.

1302. Quand on songe aux différences sans nombre qui existent entre les corps sous le rapport des pouvoirs rayonnant réfléchissant, transmissif, etc., on est tenté de croire que l'uniformité de température est impossible dans une enceinte renfermant des substances diverses; que si cette uniformité existe, on doit nécessairement la troubler en introduisant un corps dont les surfaces seraient de différente nature, et qu'un pareil corps ne peut pas conserver la même température dans tous ses points; mais l'expérience et le raisonnement s'accordent pour prouver la possibilité d'une température uniforme. Cette uniformité est même le seul état final possible; nous nous contenterons de la preuve expérimentale. On peut d'ailleurs jusqu'à un certain point concevoir l'équilibre par les compensations, en se rappelant que le pouvoir rayonnant est égal au pouvoir absorbant, qu'un corps réfléchit d'autant moins de chaleur qu'il en émet davantage (1255), et qu'une substance qui transmet facilement la chaleur doit s'échauffer moins et rayonner moins par cela même. Nous observerons seulement qu'il est fort difficile d'obtenir l'uniformité rigoureuse de température dans une enceinte un peu grande, surtout à cause des circonstances extérieures, et qu'en général dans un appartement, par exemple, on trouve toujours avec un thermomètre un peu sensible des différences dans les différents points. Equilibre de température dans une enceinte.

§ V. *Échauffement annuel et journalier.*

Chaleur reçue par la terre à différentes distances.

1303. Prenons pour unité la distance du centre du soleil au centre de la terre dans une position déterminée; ce sera en même temps à très peu près la distance de deux points quelconques pris sur les deux astres. Soit alors i la chaleur envoyée par un point du soleil à la surface de la terre; $\frac{i}{d^2}$ sera la chaleur envoyée par ce même point quand la distance deviendra d (1245). Pour un autre point on aura au même instant $\frac{i'}{d^2}$, de sorte que la chaleur totale reçue par la terre à cet instant sera $\frac{i + i' + etc.}{d^2}$; on voit qu'elle est en raison inverse du carré de la distance. Les valeurs extrêmes de la distance sont entre elles :: 30 : 29, d'où il suit que les quantités de chaleur reçues dans ces deux positions sont :: 14 : 15.

Chaleur reçue pendant un temps donné.

1304. Par une compensation remarquable la terre reçoit toujours la même quantité de chaleur pendant qu'elle décrit un degré de l'écliptique; en effet, supposons la distance double, la chaleur sera quatre fois moindre; mais la longueur du degré sera double ainsi que le rayon vecteur, d'où il suit que l'aire décrite par ce rayon sera quadruple. Or cette aire représente le temps mis à parcourir un degré; ce temps sera donc d'autant plus long que la chaleur sera plus faible. On voit d'après cela que la chaleur reçue pendant un temps donné a pour mesure l'arc de l'écliptique décrit pendant ce temps. Pour que le raisonnement fût tout-à-fait exact, il faudrait raisonner non sur un degré, mais sur une fraction infiniment petite de degré, parce qu'à la rigueur la distance change à chaque instant. Cette remarque du reste n'altère en rien la conclusion.

Sa mesure pendant une année entière.

1305. D'après des expériences de M. Pouillet, la chaleur reçue par la terre pendant l'espace d'une année serait capable de fondre une couche de glace de 14 mètres d'épaisseur, en supposant qu'elle tombât toujours perpendiculairement.

1306. C'est pendant le printemps et l'été que la terre est le plus loin du soleil, mais comme ces deux saisons durent huit jours de plus que les deux autres, en définitive la chaleur reçue est la même. Le théorème précédent montre que la compensation est parfaite puisque les arcs décrits sur l'écliptique sont de 180° chacun. Il s'ensuit aussi que les deux hémisphères reçoivent la même quantité de chaleur quoique leur température soit différente (884). Elle est la même pendant l'été et pendant l'hiver.

1307. Si la chaleur reçue par la totalité de la terre reste la même dans toutes les saisons, il y a de grandes variations dans celle qui tombe sur les différents lieux ou sur le même lieu à différentes époques. Pour l'hémisphère boréal les jours sont plus longs pendant le printemps et l'été et les rayons du soleil moins obliques. Par cette double raison la chaleur doit être plus grande. Dans les contrées du Nord où le soleil reste vingt heures et plus sur l'horizon, la température peut s'élever momentanément beaucoup plus haut que dans des contrées plus méridionales, et même, terme moyen, pendant l'été il fait plus chaud, par exemple, à Moscou qu'à Paris (886). On conçoit même que le rayonnement qui a lieu pendant les longues nuits d'hiver est une cause extrêmement puissante de refroidissement. Causes des différences de température : 1° Longueur des jours.

1308. Quant à l'obliquité des rayons, il est bien facile de concevoir son influence. On peut considérer l'horizon réel d'un lieu comme un plan circulaire, et il est évident que ce plan, qui a une largeur déterminée, recevra bien plus de rayons s'ils approchent d'être perpendiculaires ; s'ils étaient parallèles au plan il n'y en aurait aucun d'arrêté. D'ailleurs la chaleur qui tombe très obliquement se réfléchit en plus grande quantité, ce qui est une nouvelle cause de perte. 2° Obliquité des rayons.

1309. Si on suppose l'atmosphère toujours également pure, et si on néglige les inégalités qui empêchent le sol d'être horizontal, on voit que la chaleur donnée à chaque instant par les rayons du soleil doit aller en augmentant jusqu'à midi ; c'est alors en effet que les rayons ont à traverser la plus petite épaisseur d'air et qu'ils approchent le plus d'être perpendiculaires. Au moment du lever l'épaisseur traversée est de plus de 200 lieues, et cette épaisseur se com- Pourquoi le soleil est plus chaud à midi.

pose en grande partie de couches très denses et mêlées de vapeurs bien moins diathermanes que l'air pur.

Pourquoi la plus grande chaleur n'a pas lieu à midi.

1310. Ce n'est cependant pas à midi qu'a lieu le maximum de température (880), et il est facile d'en voir la raison. Le maximum aurait évidemment lieu au coucher du soleil si le sol conservait toute la chaleur qu'il reçoit; si au contraire il la perdait presque immédiatement, la plus grande élévation s'observerait à midi. Or il perd de la chaleur, et il n'en perd que peu à peu; par conséquent l'instant où il en a le plus doit arriver entre midi et le coucher du soleil. Par un raisonnement analogue on verrait que le maximum de température ne doit pas avoir lieu au solstice d'été, mais un peu après comme d'ailleurs l'observation le prouve.

Comment la terre perd la chaleur qu'elle reçoit du soleil.

1311. Le refroidissement qui suit le coucher du soleil vient de ce que les corps ne reçoivent plus de chaleur, tandis qu'ils continuent à en perdre par le rayonnement qui a encore lieu, comme nous savons, aux plus basses températures. L'air, il est vrai, rend en partie la chaleur qu'il a enlevée pendant le jour (867), et une portion de celle qui est rayonnée par le sol est encore absorbée par l'atmosphère, mais le reste va se perdre dans les espaces célestes. Il faut en définitive que dans le cours de l'année la terre perde ainsi par son rayonnement toute la chaleur qu'elle a reçue du soleil, car la température moyenne de sa surface ne varie pas. Seulement d'un jour à l'autre il y a perte ou gain suivant le temps que le soleil reste sur l'horizon. Il est d'ailleurs évident que la chaleur perdue est plus grande pendant le jour que pendant la nuit, puisque le rayonnement croît avec l'excès de température.

Influence d'un ciel serein.

1312. C'est surtout dans un lieu bien découvert et par un ciel sans nuage que la perte par le rayonnement est considérable; l'eau peut alors se geler même quand l'atmosphère est au-dessus de zéro. Au Bengale on obtient de la glace en exposant de l'eau pendant la nuit dans des vases peu profonds, établis sur une couche de paille pour les isoler du sol. Il existait, il y a quelques années, une fabrique de ce genre dans la plaine Saint-Denis, près de Paris; mais le procédé de conservation dans les glacières est plus

économique. Il ne faudrait pas croire que le refroidissement, dans ce cas, soit dû à l'évaporation, car il a encore lieu même quand l'air est saturé et pendant des nuits où il se forme de la rosée, de sorte que la glace obtenue pèse quelquefois plus que l'eau exposée.

Pour montrer encore l'influence d'un ciel découvert sur le refroidissement, nous citerons un fait remarquable noté par M. Arago. En 1762, la Seine était complétement prise, après 6 jours de gelée, dont la température moyenne était de — 3°,9 et sans que le plus grand froid eût dépassé — 9°,7; tandis qu'en 1748, la rivière coulait encore, après 8 jours d'une température moyenne de — 4°,5, le froid ayant été jusqu'à — 12°. La hauteur de l'eau était la même aux deux époques; mais en 1762 les 6 jours de gelée furent parfaitement sereins, tandis qu'en 1748 le ciel était nuageux ou totalement couvert. Le thermomètre n'indiquait que la température de l'air, celle du sol était peut-être de 10 à 12° plus basse, à cause du rayonnement.

Par le rayonnement nocturne les plantes peuvent descendre à 6 ou 7° au-dessous de la température de l'air; aussi les bourgeons sont souvent *roussis* par la gelée quand le ciel est découvert à l'époque de leur développement, c'est-à-dire, en avril. Par cela même que le ciel est découvert la lune est visible; de là le préjugé qui accusait son influence, et avait fait donner le nom de *lune rousse* à celle qui commence en avril.

1318. Ce froid qui a lieu par un ciel serein, tient au faible rayonnement de l'air qui, même quand il est très chaud, émet fort peu de chaleur (1252). Nous ne devons donc pas nous attendre à en recevoir sensiblement des régions souvent glacées de l'atmosphère. Aussi lorsque pendant une nuit sereine on tourne vers le ciel un miroir concave ayant un thermomètre à son foyer (ou mieux encore un thermo-multiplicateur), on observe un abaissement très considérable, dû évidemment à ce que les rayons provenant de l'atmosphère sont infiniment moins chauds que ceux qui viennent des corps terrestres. Un nuage ou même un

Faible rayonnement de l'atmosphère.

brouillard à peine visible passant dans la direction du miroir tempèrent notablement le froid, de sorte que cette expérience pourrait dans certains cas, mieux encore que la vue, faire juger de la pureté du ciel.

Influence des abris.

1314. On est étonné de voir le rayonnement des nuages tempérer le refroidissement d'une manière aussi efficace; mais il faut remarquer que les nuages ont en général une température supérieure à celle du milieu où ils se trouvent (1126); la chaleur qu'ils envoient est quelquefois assez sensible pour être appréciée par nos sens. Ainsi quand on voyage par une nuit froide et sereine sur l'impériale d'une voiture on se sent manifestement réchauffé si le ciel vient à se couvrir. D'ailleurs les expériences du docteur Wells montrent combien est grande l'influence des abris les plus légers pour tempérer le refroidissement; sous une simple mousseline tendue sur des piquets, il a vu le gazon de plusieurs degrés moins froid qu'à l'air libre. On fait prendre quelquefois un voile aux voyageurs qui visitent les glaciers, où l'on n'arrive qu'après une marche échauffante. On tempère ainsi la perte très considérable qui aurait lieu par le rayonnement, au milieu d'une enceinte glacée, et par un ciel découvert; sans cette précaution il n'est pas rare d'observer, surtout chez les jeunes gens, des gerçures au visage et un renouvellement de l'épiderme.

Théorie de la rosée.

1315. Nous avons vu que la cause prochaine de la rosée était le refroidissement du sol (1118); maintenant nous pouvons nous rendre compte des diverses particularités de ce phénomène, puisque nous connaissons les circonstances qui influent sur le refroidissement nocturne. D'abord, il est évident que si la rosée s'observe surtout après une journée chaude, c'est que l'évaporation ayant été plus grande, l'air étant plus près d'être saturé, un moindre refroidissement suffit pour animer la précipitation de la vapeur. Par la même raison la rosée est plus abondante après certains vents humides, ceux du sud-ouest en France, ceux du nord en Égypte, etc. En général, le vent empêche la formation de la rosée parce que le sol continuel-

lement réchauffé par l'air qui se renouvelle ne peut pas devenir plus froid que lui. L'influence si connue d'un ciel serein tient, comme nous savons, à ce que le sol perd alors beaucoup par le rayonnement. De même on prévoit qu'il doit y avoir plus de rosée dans un lieu découvert que dans un lieu abrité. Quant à celle qu'on voit si souvent pendant l'hiver sur les vitres à l'intérieur des appartements où quelquefois elle gèle en formant des arborisations variées, on peut remarquer qu'elle se forme spécialement sur les vitres d'où l'on découvre la plus grande partie du ciel ou la partie la plus froide. Si la gelée blanche s'observe plus particulièrement sur les toits exposés an nord, c'est que la région nord de l'atmosphère est plus froide, n'étant pas échauffée dans le jonr par les rayons du soleil qne réfléchissent les bâtiments exposés au midi. On sait que, toutes choses égales, la rosée se dépose de préférence sur les corps mauvais conducteurs, doués d'un grand pouvoir rayonnant, comme le verre, le bois, l'herbe, la laine, le duvet, etc.; cela est facile à concevoir; leur surface se refroidit très vite par le rayonnement, et le défaut de conductibilité s'oppose à ce que la chaleur des parties plus profondes vienne réparer la perte. Il n'en est pas de même des métaux; la chaleur du sol se transmet facilement à leur surface, qui en outre rayonne peu, surtout quand elle est bien polie. Il est à remarquer que les métaux oxidables se couvrent de rosée plutôt que les autres; en général, les propriétés chimiques et l'état électrique des différentes substances jouent un certain rôle dans le phénomène de la rosée, mais le refroidissement préalable reste en définitive la cause fondamentale. Il ne faut cependant pas croire que les corps sur lesquels on trouve le plus de rosée doivent être toujours les plus froids, car la liquéfaction même de la vapeur est une cause puissante de réchauffement (1195).

1316. Rigaud de Lisle a fait une application remarquable de la propriété qu'ont certains corps de se couvrir abondamment de rosée; ils recueillait ce liquide dans l'intention d'y rechercher les substances fort peu connues, Application remarquable.

qu'on désigne sous le nom de miasmes. Près de Rome, dans un lieu où l'*aria cattiva* produisait ses effets délétères il avait établi son appareil, consistant tout simplement en un carreau de verre incliné dont un angle aboutissait à une bouteille. On en remplit deux en une seule nuit ; elles furent analysées six mois après par Vauquelin qui y trouva une matière animale en flocons, de l'ammoniaque, du chlorure de sodium et du carbonate de soude ; l'eau était restée limpide; elle avait une odeur légèrement sulfureuse qu'on n'avait pas sentie lorsqu'on l'avait recueillie.

§ VI. *Lois de Dulong et Petit.*

Inexactitude de la loi de Newton.

1317. La loi de Newton n'est véritablement qu'une règle empirique sans fondement rationnel. Elle tient compte seulement de la différence de température et point du tout de la température elle-même ; les effets du rayonnement s'y trouvent confondus avec ceux du contact de l'air ; tout ce qui dépend de la forme du corps, de son pouvoir rayonnant, etc., y est évalué implicitement par la raison *q* (1277), sans qu'aucune discussion ait établi la légitimité d'une évaluation pareille. Aussi l'inexactitude se manifeste dès qu'on sort des températures atmosphériques; et même dans les limites où elle s'accorde le mieux avec l'expérience, la loi de Newton ne doit certainement pas être considérée comme la véritable loi du refroidissement. Ce phénomène d'ailleurs a lieu dans des circonstances si différentes qu'il ne peut pas y avoir une loi unique, indistinctement applicable à tous les cas.

Procédé pour étudier le refroidissement.

1318. On doit à MM. Dulong et et Petit les véritables lois du refroidissement dans le vide et dans les gaz. Essayons de nous faire une idée de la marche qu'ils ont suivie et des résultats qu'ils ont obtenus. Pour ne pas compliquer le phénomène des effets de la conductibilité, il faut évidemment étudier le refroidissement d'un simple point matériel; or, on s'approche autant qu'on veut de cette abstraction en prenant des corps très petits ou des liquides dans lesquels les courants entretiennent l'unifor-

mité de température. Plusieurs de ces corps peuvent être simplement des thermomètres de différente nature, de différente forme, de différent volume; quant aux autres, un thermomètre plongé dans leur masse donnera leur température. Qu'on imagine maintenant un ballon en cuivre mince, pour qu'il se mette facilement en équilibre de température, et noirci intérieurement pour qu'il ne réfléchisse pas la chaleur; en le tenant plongé dans la glace, dans l'eau ou dans une huile fixe, on pourra faire varier sa température depuis 0° jusqu'à 300°, et la maintenir un temps quelconque à tel degré qu'on voudra. C'est dans cette enceinte qu'on suspendra les corps sur lesquels on veut étudier le refroidissement, après leur avoir préalablement donné un excès connu de température dont la variation sera indiquée à chaque instant sur la tige thermométrique sortant du ballon. On observera successivement ainsi la marche du phénomène dans l'enceinte vide, puis dans l'enceinte pleine d'air ou d'un gaz quelconque, à tel ou tel degré de force élastique.

Procédé pour compléter les séries d'observations.

1319. On voit d'après cela quel immense travail on doit faire seulement pour obtenir des séries d'observations; encore ces séries sont-elles nécessairement incomplètes puisqu'on ne peut pas observer continuellement; on sent donc la nécessité d'interpoler (1020). Pour cela MM. Dulong et Petit, après avoir pris dans chaque cas un certain nombre d'observations thermométriques, ont construit avec trois d'entre elles une formule qui représentait exactement toutes les autres et par conséquent celles qu'ils n'avaient pas prises. Leur formule était celle de Newton modifiée; mais pour plus d'exactitude ils partageaient la durée totale du refroidissement en plusieurs intervalles, et pour chacun se servaient d'une formule appropriée. Avec cette série de formules ils pouvaient avoir la température de seconde en seconde, pendant toute la durée du refroidissement. Chaque expérience du reste nécessitait un travail du même genre.

Procédé pour tenir compte de l'imperfection du vide.

1320. Afin d'avoir la marche du refroidissement dans le vide absolu, ils ont étudié cette marche dans de l'air à

différents degrés d'élasticité, et d'après la loi qui s'est manifestée ils ont pu calculer ce qui aurait eu lieu dans le cas d'une élasticité nulle, c'est-à-dire dans le vide parfait.

Proportionnalité des vitesses de refroidissement.

1321. La *vitesse* avec laquelle un corps se refroidit à un instant déterminé peut se mesurer par l'abaissement de température en une seconde; or en examinant les résultats obtenus par les procédés que nous venons d'indiquer, après avoir rapporté toutes les températures au thermomètre à air (933), MM. Dulong et Petit ont reconnu que la vitesse de refroidissement était soumise à des lois très remarquables. Ces lois sont les mêmes pour tous les corps, quelle que soit leur nature. Les variations de forme et de volumes sont aussi sans influence, du moins tant qu'elles n'empêchent pas l'uniformité de température. Si donc deux corps différents sont placés dans les mêmes circonstances, avec un même excès de température, et que le refroidissement de l'un pendant la première seconde ait été par exemple trois fois aussi grand que celui de l'autre, il y aura toujours la même proportion dans les vitesses de refroidissement pour des excès de température égaux quelconques.

Refroidissement par le rayonnement.

1322. La vitesse de refroidissement dans le vide dépend non-seulement de la différence θ entre la température du corps et celle de l'enceinte, mais aussi de la température t de l'enceinte ; la relation est exprimée par la formule

$$v = m\, a^{t}\left(a^{\theta} - 1\right)$$

a est le nombre invariable 1,0077 ; m est un coefficient constant qui dépend du corps que l'on considère ; on le détermine par la formule même en mesurant directement une valeur de v, c'est-à-dire un abaissement de température pendant un temps très court, par exemple pendant une minute, ce qui donne en général une approximation suffisante. Mettant le nombre obtenu avec les valeurs correspondantes de t et de θ, on n'a plus qu'à tirer m et la formule donne ensuite v pour toutes les valeurs simul-

tanées de t et de θ. Il ne faut pas oublier que les températures doivent être comptées sur le thermomètre à air (933).

Refroidissement par les gaz.

La nature de la surface est sans influence.

Influence de la différence de température.

1323. La vitesse du refroidissement par le contact d'un gaz dépend seulement de la différence de température et de la pression ; le poli de la surface, son pouvoir absorbant, etc., sont sans influence. La vitesse de refroidissement ne varie pas lorsque la densité du gaz vient à changer, pourvu que la pression reste la même. Le refroidissement est un peu plus que double quand la différence de température est doublée; si, par exemple, dans le premier cas il a été de 1° en $1'$, il sera dans le second de $2^n\ 35$; par approximation on peut admettre la proportionnalité. Quant aux différents gaz, on observe que les plus légers sont ceux qui refroidissent le plus vite, sans doute à cause de la mobilité plus grande de leurs molécules. Par exemple, si sous la pression $0^m,76$ l'air a fait baisser un thermomètre de 1° en $1'$, l'hydrogène dans les mêmes circonstances le ferait baisser de $3^n,45$, l'acide carbonique de $0^o,965$.

— de la pression.

Comparaison des deux modes de refroidissement.

1324. Afin qu'on puisse juger des valeurs relatives du refroidissement par le rayonnement et par l'air, nous rapporterons les résultats de quelques expériences de MM. Dulong et Petit.

Excès de la température du thermomètre sur celle de l'enceinte.	Vitesse de refroidissement dans l'air.	Vitesse dans le vide.	Différence ou vitesse due au contact de l'air.
200°	14,04	8,56	5,48
180	11,76	7,01	4,75
160	9,85	5,68	4,17

Ici il s'agissait d'un thermomètre en verre à surface naturelle; on voit que surtout dans les hautes températures il perdait plus de chaleur par le rayonnement que par le contact de l'air. C'était le contraire avec la surface argentée comme le montrent les résultats suivants obtenus dans des circonstances pareilles; on remarquera de plus que la perte par l'air reste la même malgré le changement de la surface.

200°	6°93	1,50	5,43
180	6,02	1,23	4,79
160	5,19	1,00	4,19

CHAPITRE X.

PRODUCTION ET NATURE DE LA CHALEUR.

§ I. *Chaleur produite par la combustion.*

Ce que c'est que la combustion.

1325. La *combustion* consiste dans une combinaison chimique pendant laquelle il se produit de la chaleur et de la lumière. Quand, par exemple, le charbon *brûle,* c'est qu'il se combine avec l'oxigène ; c'est un fait que la chimie a depuis longtemps mis hors de doute. Le résultat de la combinaison est un gaz qui ordinairement se perd dans l'atmosphère ; mais on peut le recueillir et même en retirer le charbon en totalité, de sorte que la combustion n'anéantit réellement rien. La combustion du reste ne s'effectue que dans des circonstances données; il faut une certaine température; mais quand une fois le phénomène a commencé dans quelques points, la chaleur produite par l'action chimique suffit pour faire rougir toute la masse et maintenir l'incandescence jusqu'à la fin. Nous avons pris la charbon et l'oxigène pour exemple, mais il peut y avoir combustion entre beaucoup d'autres corps, entre l'hydrogène et le chlore, le chlore et le phosphore, le soufre et le cuivre, etc. ; il est bon de noter cependant que dans les combustions ordinaires l'oxigène fourni par l'air est toujours un des éléments de la combinaison.

Idée qu'on doit se faire de la flamme.

1326. Lorsque la combustion a lieu entre des gaz, ou lorsqu'il se produit des gaz pendant la combustion, ceux-ci

s'échauffent jusqu'à l'incandescence et constituent la *flamme*. Dans les flammes ordinaires l'incandescence se borne à la couche très mince qui est en contact avec l'air ; à l'intérieur la température est si peu élevée que dans les lampes à alcool, qui donnent tant de chaleur, la mèche se carbonise à peine. Il est à noter qu'on ne peut pas juger de la température d'une flamme par la vivacité de la lumière ; la flamme d'un mélange d'oxigène et d'hydrogène, qui est la plus chaude que l'on connaisse, est à peine visible.

1327. La température de la flamme est extrêmement élevée, mais sa chaleur est peu considérable à cause du peu de masse ; aussi le contact d'un corps froid lui fait-il aisément perdre son incandescence ; on sait qu'elle ne peut pas traverser une toile métallique froide, à mailles un peu serrées ; c'est là-dessus qu'est fondée la *lampe de sûreté* de Davy. Dans certaines mines de houille il se dégage du gaz hydrogène carboné qui avec l'air produit un mélange explosif auquel on court risque de mettre le feu avec une lampe ordinaire. On évite le danger avec une lampe entourée d'une toile métallique ; il peut bien y avoir inflammation du mélange dans l'enceinte formée par cette toile, mais la flamme qui résulte de cette explosion se trouve tellement refroidie, en traversant les mailles, qu'elle ne peut mettre le feu au gaz extérieur. Dans le chalumeau à gaz (561) le tube à l'extrémité duquel on allume le mélange contient une centaine de rondelles de toile métallique pour empêcher l'inflammation de se communiquer à l'intérieur. Effet des toiles métalliques sur la flamme.

1328. C'est une question qui intéresse à la fois la physique et l'économie industrielle que de mesurer la chaleur produite par la combustion des diverses substances. On s'est occupé spécialement du cas où la combustion se fait par l'oxigène. Le procédé consiste en général à brûler un poids déterminé de la substance que l'on considère dans une enceinte disposée de telle sorte qu'on puisse recueillir et mesurer toute la chaleur dégagée. Lavoisier et Laplace se servaient du calorimètre de glace (1188) ; Rumford, Mesure de la chaleur produite par la combustion.

Despretz ont mesuré la chaleur par l'échauffement de l'eau, Marcus Bull par l'échauffement d'une enceinte de grande dimension. Nous donnerons ici le tableau des principaux résultats.

1329. *Table de la chaleur donnée et de l'oxigène absorbé par 1^k des différents combustibles.*

Pouvoirs calorifiques à poids égal.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	UNITÉS DE CHALEUR.	OXIGÈNE ABSORBÉ.
Hydrogène pur	23640	8^k,01
Cire blanche	9479	3 ,1
Huile de colza épurée	9307	»
Huile d'olive	9044	3 ,0
Suif	8369	3 ,1
Ether sulfurique $d = 0,728$	8030	2 ,5
Carbone pur	7914	2 ,616
Phosphore	7500	1 ,5
Huile de naphte, $d = 0,827$	7338	3 ,2
Charbon de bois	7300	2 ,6
Hydrogène bicarboné	6600	3 ,3
Coke	6500	2 ,2
Charbon de tourbe	6400	»
Alcool à 42°	6195	2 ,4
Houille grasse moyenne	6000	2 ,2
Alcool à 33°	5261	»
Essence de térébenthine	4500	3 ,2
Bois parfaitement sec	3500	1 ,3
Tourbe de bonne qualité	3000	»
Bois séché à l'air	2600	1
Oxidede carbone	1800	0 ,57

Remarques.

1330. On voit que la chaleur donnée augmente avec la quantité d'oxigène absorbé; mais la proportion n'est pas exacte. Il y a même des anomalies très fortes pour le phosphore, l'huile de naphte, l'essence de térébenthine et le gaz de l'éclairage; le premier absorbe peu d'oxigène pour produire beaucoup de chaleur, les autres en absorbent beau-

coup, sans donner une chaleur très forte. Au reste, ce tableau présente plutôt des résultats économiques que scientifiques; on n'y tient compte que de la chaleur qui devient libre et point du tout de celle qui peut rester latente dans les liquides ou dans les gaz produits par la combustion. Plusieurs des évaluations sont certainement trop faibles, parce que dans le procédé de Rumford on perd une partie de la chaleur rayonnante. Les seuls résultats qu'on puisse regarder comme bien exacts sont ceux relatifs à l'hydrogène et au carbone pur; ils sont dus à M. Despretz.

Les différents expérimentateurs ont trouvé des différences considérables dans la chaleur produite par un même poids du même combustible; on attribue ces différences à des erreurs d'observation, et on admet que la chaleur dégagée est toujours la même de quelque manière que la combustion se fasse. Mais cette question mériterait de nouvelles recherches.

1331. Il est facile, avec le tableau précédent, de calculer la quantité d'eau que peut faire bouillir un poids donné de tel ou tel combustible. Si par exemple il n'y avait aucune perte, 1^k de houille ferait bouillir 60^k d'eau (1142). Le même poids fondrait 80^k de glace (1185), ou volatiliserait $9^k,3$ d'eau prise à zéro (1195). Mais ces résultats sont des limites qu'on ne peut atteindre avec les dispositions en usage. Tout au plus volatilise-t-on 6^k d'eau avec 1^k de houille; généralement même on n'en retire pas plus de 3600 unités de chaleur. Applications.

1332. Il n'y a pas de grandes différences dans le pouvoir calorifique des différents bois mesurés au poids, mais il y en a de grandes quand on mesure au volume, comme on le verra dans le tableau suivant, calculé par M. Peclet; on y prend pour unité le *kilotherme* ou mille unités de chaleur. Pouvoirs calorifiques à volume égal.

Chaleur donnée par

	Une corde de bois d'une année de coupe.	Un hectolitre de charbon.
Noyer	7742	292
Chêne	6846	255
Frêne	5974	219
Hêtre	5603	176
Orme	4487	167
Bouleau	4102	153
Châtaignier	4055	146
Charme	5572	176
Pin	4263	160
Peuplier d'Italie	3069	109
Un hectolitre de houille moyenne donne		480
Un hectolitre de coke		182

La corde dont on parle ici est de 4 stères.

Valeur relative des combustibles.

1333. Connaissant le prix des différents combustibles, il est aisé maintenant de juger leur valeur relative; à Paris, par exemple, la houille vaut ordinairement 4 f. 40 c. l'hectolitre, le coke 2 f. 85 c., le charbon de bois 4 fr., la corde de hêtre 70 fr.; on trouve d'après cela pour le prix de mille unités de chaleur par la houille 0,009, par le bois 0,012, par le coke 0,015, par le charbon de bois 0,025. Ainsi à Paris le chauffage par le charbon de terre est le plus économique.

Leur pouvoir rayonnant.

1334. D'après les expériences de M. Peclet, la chaleur rayonnante que le charbon donne pendant sa combustion est environ le tiers de la chaleur totale; pour la houille et le coke la proportion est plus forte, mais pour le bois elle n'est guère que le quart, et elle ne s'élève pas même au sixième dans les appareils d'éclairage, ce qui montre encore que la flamme rayonne beaucoup moins que les corps solides (1255).

Chauffage des appartements.

1335. Dans le chauffage par les cheminées ordinaires on

n'utilise réellement que la chaleur rayonnante, dont il n'y a guère que le quart qui soit dirigé vers l'appartement; de sorte que quand on brûle du bois, on perd les 15 seizièmes de la chaleur produite. L'effet utile peut aller au huitième dans les cheminées bien construites, où le foyer est peu profond, les parois convenablement inclinées et douées d'un grand pouvoir réfléchissant. Le cuivre poli, sous ce rapport, est préférable à la faïence (1258). Du reste les rayons directs ou réfléchis n'échauffent pas l'air immédiatement (1297), ils vont tomber sur les murailles ou les meubles, contre lesquels l'air vient ensuite s'échauffer. Aussi obtient-on bien plus vite une douce température avec les cheminées-poêles et les poêles proprement dits. En outre, la dépense est beaucoup moindre; dans des expériences faites au Conservatoire des Arts et Métiers de Paris, on a trouvé que, pour obtenir une même élévation de température, il fallait brûler un poids de combustible représenté par

100 dans une cheminée ordinaire;
39 dans une cheminée de Rumford;
33 dans une cheminée de Désarnod;
21 dans un poêle de Curandeau en tôle;
16 dans un poêle de Désarnod, en fonte et en tôle.

1336. Comme application, calculons la quantité de bois nécessaire pour maintenir une chambre à 20°, la température extérieure étant à 0°. La perte par les murs peut être négligée, mais il faut tenir compte du refroidissement par les vitres. Pour une différence de 1° on admet une perte de 11,35 unités de chaleur par mètre carré et par heure; ici, d'après la loi de Newton, nous aurons 227 unités ou 1362, s'il y a 6 mètres carrés de surface de vitres. Supposons qu'il y ait 20 personnes dans la chambre; il faut, terme moyen, à chacune un mètre cube d'air par heure; la ventilation demandera donc 140^m pesant 182^k; il faut par conséquent 900 unités de chaleur pour porter cet air pris au dehors de 0 à 20° (1156). Ainsi la quantité totale de Application.

chaleur à fournir sera de 2272 unités par heure; $\frac{1}{801}$ de stère de bois de hêtre suffirait, s'il n'y avait pas de perte; mais comme l'effet utile dans une cheminée ordinaire n'est que $\frac{1}{16}$ de l'effet total, on devra brûler par heure $\frac{1}{35}$ de stère, ce qui fait un poids de 19, 5; dans une cheminée à la Désarnod le tiers suffirait, et avec un poêle il ne faudrait que $1^k,68$.

Fourneaux à haute température.

1337. Dans les arts où l'on a besoin de températures très élevées on réunit plusieurs circonstances très importantes sous le rapport de l'économie et de l'effet à obtenir. Ainsi, autant que possible, on chauffe d'une manière continue, afin d'éviter la perte de chaleur qui a nécessairement lieu dans la mise en train; les hauts fourneaux pour faire la fonte marchent sans discontinuer des années entières. Il y a évidemment de l'avantage à opérer en grand; une masse considérable de combustible perd moins que si elle était divisée, et on obtient une chaleur beaucoup plus forte. La combustion doit se faire avec une grande rapidité; c'est une condition de la plus haute importance; on la remplit de diverses manières. Dans les verreries, par exemple, le bois refendu et parfaitement sec brûle si rapidement qu'il ne produit aucune fumée; aussi n'y a-t-il pas de cheminée au-dessus du four. Avec les petits fourneaux de coupelle on n'obtient pas la fusion de l'or ou de l'argent, si le charbon n'est pas en petits morceaux laissant une certaine quantité d'air entre eux. Dans les hauts fourneaux, outre le tirage, on a encore pour activer la combustion le courant d'air forcé que donnent les machines soufflantes (562). On a reconnu dans ces derniers temps qu'il y avait un très grand avantage à chauffer cet air d'avance à 4 ou 500°.

Perte remarquable de chaleur.

1338. En général la perte de chaleur est énorme dans les opérations qui exigent une haute température. Par exemple, dans les fourneaux à fondre la fonte on brûle, terme moyen, $\frac{1}{2}$ kil. de houille par kil. de fonte. Or, d'après une expérience de M. Clément, 1 kil. de fonte en fusion, projeté dans 20 kil. d'eau à 0°, en élève la température à 14°; il contient, par conséquent, 280 unités de

chaleur ; mais comme ½ kil. de houille en donne 3000, on voit que la perte est de plus des neuf dixièmes. Dans plusieurs industries on utilise maintenant de diverses manières le courant d'air excessivement chaud que les fourneaux laissent échapper; on s'en sert pour la fabrication de la chaux, la préparation de la soude, l'échauffement des tuyaux contenant l'air poussé par les machines soufflantes, etc.

§ II. *Sources de chaleur.*

1339. La combustion que nous venons d'étudier comme le moyen le plus fréquemment employé d'obtenir de la chaleur n'est qu'un cas particulier du phénomène général de la production de la chaleur par les actions chimiques. Actuellement nous examinerons quelques cas encore très remarquables, quoiqu'ils n'aient pas autant d'importance sous le point de vue économique.

1° Sources accidentelles. Chaleur produite par les actions chimiques.

1340. Lavoisier et Laplace, en mêlant 734 gr d'eau avec 979 d'acide sulfurique concentré, ont obtenu assez de chaleur pour fondre 1529gr de glace. Un mélange de 12k,5 de ce même acide, avec 5 k d'eau, donne une température de 130°. L'huile de gayac prend feu quand on la mêle avec de l'acide nitrique très concentré ; il suffit d'opérer sur une once de chaque substance.

Combinaison de deux liquides.

1341. Un grand nombre de gaz s'échauffent subitement par leur action réciproque ; c'est ce qu'on voit avec le chlore et l'hydrogène sulfuré ou l'hydrogène bicarboné; avec le gaz ammoniac il y a même dégagement de lumière. On sait aussi que l'hydrogène perphosphoré s'enflamme dans l'air à la température ordinaire.

Combinaison de deux gaz.

1342. L'action chimique entre deux corps solides est, en général, trop peu énergique pour qu'il y ait une élévation appréciable de température ; cependant il y a production de chaleur pendant le mélange de la chaux et du sel ammoniac, et surtout par l'action de la glace sur les acides sulfuriques ou phosphoriques anhydres.

Combinaison de deux solides.

1343. La chaleur due à l'action chimique des liquides

Combinaison d'un solide et d'un liquide.

sur les solides se manifeste dans une foule de cas; ainsi, quand on verse de l'eau sur de la chaux il y a un échauffement très considérable et qui peut aller jusqu'à enflammer de la poudre; la baryte rougit quand on la mouille avec l'acide sulfurique concentré; ce même acide enflamme, comme on sait, les allumettes dites oxigénées; le potassium qu'on fait passer sous une éprouvette pleine d'eau y devient incandescent; le charbon qui résulte de la calcination de l'émétique rougit et produit une violente explosion dès qu'on vient à l'humecter.

Combinaison d'un solide et d'un gaz.

1344. Les pyrophores, l'inflammation spontanée d'un mélange de phosphore et d'oxide de phosphore dans l'air, celle du phosphore dans le chlore, etc., montrent assez qu'il peut se produire de la chaleur par l'action des substances gazeuses sur les solides.

Combinaison d'un liquide et d'un gaz.

1345. Il s'en produit aussi quand les gaz se combinent avec des liquides, par exemple, pendant la combinaison du gaz hydrochlorique ou du gaz ammoniac avec l'eau. Il y a même dégagement de lumière quand on fait arriver un courant de chlore dans l'ammoniaque liquide.

Remarques.

1346. Dans les cas que nous venons d'indiquer, les substances sont à la température ordinaire; dans d'autres cas la combinaison ne commence qu'à une température un peu élevée, mais la chaleur qu'on donne ainsi d'abord n'est rien en comparaison de celle qui se produit ensuite. C'est ce qu'on voit dans la combustion ordinaire, dans l'inflammation des gaz, dans celle de la poudre, etc.

Quelquefois la chaleur qui résulte d'une action chimique est si faible qu'elle échappe aux sens; mais on peut la reconnaître par d'autres moyens. Ainsi un bâton de phosphore qui paraît lumineux dans l'obscurité mais sans chaleur sensible, affecte le thermomètre multiplicateur (1252). D'ailleurs, quand on opère sur une certaine masse, la température peut s'élever assez pour déterminer l'inflammation; aussi dans la préparation de l'acide qui résulte de la combustion lente du phosphore, a-t-on bien soin d'isoler chaque bâton dans un petit entonnoir de verre. La chaleur qui se développe dans la pâte faite avec

l'eau, la limaille de fer et le soufre est à peine appréciable sur de petites masses ; mais en opérant sur une trentaine de kilogrammes on obtient des effets tels que Lemery a eu l'idée de les comparer à ceux d'un volcan. De même, dans la fermentation, la chaleur peut devenir très considérable quand la masse est grande ; on sait que des meules de foin humide peuvent s'enflammer et que des toiles peintes entassées, encore fraîches, ont quelquefois pris feu.

La chaleur qui devient sensible dans les actions chimiques n'est souvent encore qu'une partie de celle qui se produit. Une portion considérable peut devenir latente par les changements d'état, comme la fusion et la volatilisation. Dans les mélanges réfrigérants, le froid dû à la liquéfaction compense et au-delà l'élévation de température qui résulterait de l'action chimique considérée isolément.

Chaleur produite par des actions physiques.

Adhésion des liquides.

1347. Leslie avait observé une certaine élévation de température en humectant un linge qui enveloppait la boule d'un thermomètre; M. Pouillet a généralisé le fait et a constaté qu'il se produisait de la chaleur toutes les fois qu'un liquide *mouillait* un solide, lors même qu'il n'y avait aucune action chimique. L'effet ne dépasse guère un quart de degré pour les substances inorganiques, telles que le verre, les métaux, etc., soit qu'on les mouille avec de l'eau, de l'alcool, de l'huile, ou différents acides. Mais en humectant avec de l'eau certaines substances organiques, préalablement desséchées, par exemple, des membranes réduites en petits fragments, on obtient une élévation de température qui va jusqu'à 10°.

Adhésion des gaz.

1348. On sait que les gaz adhèrent avec une force remarquable à certains métaux (115) et à plusieurs autres substances, surtout quand elles sont poreuses (116). Au moment où l'adhésion s'établit il se produit de la chaleur comme avec les liquides. S'il y a un mélange de gaz qui puissent se combiner, la température s'élève quelquefois assez pour que la combinaison s'effectue. C'est ce qui a lieu quand on met du fil ou de l'*éponge* de platine

dans un mélange d'oxigène et d'hydrogène, ou quand on souffle ce dernier gaz sur l'éponge à travers l'air. Si le platine est mêlé avec des substances inertes la combinaison se fait peu à peu, mais s'il est pur la température s'élève jusqu'au rouge, et il y a détonation. C'est à M. Dobereiner qu'on doit la connaissance de cette propriété qu'a le platine de déterminer la combinaison des gaz. MM. Dulong et Thénard ont depuis constaté que plusieurs autres substances jouissaient de la même propriété; le palladium, le rhodium et l'iridium l'ont comme le platine, à la température ordinaire; l'or à 120° seulement; le charbon, la pierre ponce, le verre, la porcelaine à 250°.

Solidification. Liquéfaction. Compression.

1349. Nous savons qu'il se dégage de la chaleur pendant la solidification des liquides (1190), la liquéfaction des vapeurs (1195), la compression des gaz (1172). Il s'en dégage aussi, mais très peu, pendant la compression des liquides, car MM. Colladon et Sturm n'ont pas obtenu avec de l'éther plus de 5 à 6° d'élévation par une compression brusque de 40 atmosphères, ou par le choc d'un coup de marteau. L'effet était encore moindre sur les autres liquides. Ils se servaient du thermomètre de Bréguet (894).

Percussion.

1350. Quant aux solides, on sait par exemple que les pièces de monnaie s'échauffent sous les coups du balancier; mais comme l'effet a lien même quand la pièce ne change plus de densité, on doit l'attribuer plutôt à la percussion qu'à la diminution de volume. Un forgeron adroit parvient à faire rougir une barre de fer à force de la frapper sur son enclume. Il est naturel de croire que l'inflammation des amorces fulminantes est due à la chaleur dégagée par la percussion.

Frottement.

1351. Le frottement est un des moyens les plus puissants de produire de la chaleur; mille expériences vulgaires le démontrent; ainsi, les limes, les forets, les outils employés sur le tour s'échauffent jusqu'à brûler la main; les roues prennent feu quelquefois par le frottement sur les essieux; on fait aisément fumer deux morceaux de bois en les frot-

tant l'un contre l'autre; c'est, comme on sait, un moyen employé par les sauvages pour se procurer du feu. Le briquet ordinaire est aussi fondé sur le frottement; le silex arrache des parcelles d'acier qui, étant ainsi échauffées jusqu'à rougir, brûlent dans l'air et forment les étincelles. L'oxide de fer qui en résulte fond et tombe en petits globules qu'il est aisé de recueillir sur du papier. L'acier réussit mieux que le fer, parce qu'étant plus dur les parcelles sont plus petites et qu'il faut un frottement plus rude pour les arracher. Avec deux silex on obtient aussi du feu, mais non de véritables étincelles, parce que les parcelles détachées ne peuvent que rougir. Il en serait de même de l'acier dans le vide (527). Dans les véritables briquets phosphoriques le phosphore qu'on prend au bout de l'allumette s'échauffe et s'enflamme par le frottement; c'est encore la chaleur due au frottement sur le papier à l'émeri qui explique le jeu des briquets dont les allumettes sont garnies de poudre fulminante. Nous indiquerons encore deux expériences remarquables, en ce qu'elles peuvent donner la mesure de la chaleur produite par le frottement; la première, qui est de Davy, consiste à fondre de la glace en en frottant deux morceaux l'un contre l'autre; la seconde est de Rumford. Ce physicien, en faisant tourner l'une sur l'autre, à l'aide d'une machine à forer les canons, deux pièces de bronze plongées dans l'eau, finit par mettre ce liquide en pleine ébullition.

1352. L'électricité, comme moyen de produire de la chaleur, est tout-à-fait comparable aux actions chimiques les plus énergiques. Nous verrons qu'avec l'électricité on fond les métaux les plus réfractaires plus facilement encore qu'avec le chalumeau d'oxigène et d'hydrogène. D'ailleurs certains effets de la foudre montrent la puissance calorifique de cet agent. Electricité.

1353. Les sources de chaleur que nous venons d'examiner sont en quelque sorte artificielles ou n'ont qu'une existence momentanée, mais la nature nous en présente 2° Sources constantes.

qui ont une durée indéfinie ou qui sont remarquables par leur reproduction constante.

Chaleur du soleil.

Sa cause probable.

1354. Il est naturel de croire que la chaleur du soleil est due à une combustion; sans doute l'imagination s'effraie de la durée du phénomène, mais sur notre planète même nous voyons dans les volcans des combustions qui durent depuis des milliers d'années et il n'y a pas de comparaison à faire pour les dimensions. D'ailleurs l'incandescence du soleil aura probablement un terme comme celle de plusieurs étoiles qui ont disparu. Nous reconnaîtrons en optique que la partie visible de cet astre est une matière analogue à la flamme et non pas un corps solide incandescent.

Mesure approximative.

1355. On peut avoir une mesure approximative de la chaleur dans le soleil même, en prenant celle des rayons solaires pour terme de comparaison. Imaginons que la surface entière du ciel rayonne comme le soleil; un corps placé dans cette enceinte recevra autant de chaleur que s'il était dans le soleil même, car la chaleur reçue ne dépend pas du rayon de l'enceinte (1245). Or le soleil n'occupe que la 184000e partie de la sphère céleste ; la chaleur de cet astre serait donc 184000 fois aussi grande que celle que nous recevons.

Concentration des rayons solaires par la réflexion.

1356. La concentration des rayons solaires offre un des moyens les plus puissants de produire de la chaleur. En faisant tomber sur un même point les rayons réfléchis par un grand nombre de petits miroirs plans, Buffon enflammait du bois à plus de 200 pieds ; à 45 pieds il mettait l'argent en fusion. Ces expériences rendent plus probable ce qu'on raconte des miroirs ardents d'Archimède. On sait que les anciens se servaient de coupes pour obtenir le feu du ciel, et cela peut se concevoir quand on observe que le très petit miroir concave, formé par la boîte d'une montre, suffit pour enflammer l'amadou.

— Par la réfraction.

1357. Les verres sont préférables aux miroirs pour concentrer la chaleur du soleil, d'abord parce qu'il y a moins de perte par la transmission que par la réflexion et ensuite parce qu'il est plus aisé d'exposer un corps aux

rayons qui viennent d'en-haut. Parmi les lentilles les plus puissantes on peut citer celle de Trudaine avec laquelle Lavoisier et Brisson firent de nombreuses expériences au Louvre. Cette lentille était formée par deux glaces courbes accolées; on remplissait la cavité interceptée avec 140 pintes d'esprit-de-vin. Le diamètre était de 4 pieds, et le foyer qui se formait à 10 pieds environ avait 15 lignes de largeur; mais au moyen d'une seconde lentille on réduisait cette largeur à 8 lignes, de sorte que les rayons tombant sur les lentilles étaient concentrés dans un espace 5184 fois plus petit. En évaluant la perte par réflexion et absorption à $\frac{1}{5}$, on voit que la chaleur produite devait être environ 4000 fois plus forte que celle du soleil. Il est à remarquer cependant qu'on n'a pu fondre au foyer ni le cristal de roche, ni le platine. Nous parlerons dans l'optique des lentilles à échelons que Fresnel a substituées aux lentilles creuses.

1358. Il y a, comme nous savons, une certaine chaleur dans l'intérieur de la terre (870); elle provient, suivant M. Poisson, de ce que notre planète a traversé des régions d'une température élevée où elle s'est échauffée jusqu'à une certaine profondeur (878). La chaleur des parties superficielles est à peu près dissipée, mais il reste celle des couches profondes. Dans cette manière de voir, une période de quelques centaines de siècles suffit pour expliquer les changements de température démontrés par la géologie et l'histoire naturelle fossile. Dans l'ancienne hypothèse de la chaleur centrale, il faudrait remonter à des millions de millions d'années pour trouver dans les régions septentrionales une température convenable à certains êtres organisés, qu'on sait y avoir vécu. Ampère n'admettait pas non plus l'hypothèse de la chaleur centrale; seulement il supposait qu'une couche du globe peu épaisse et peu éloignée de la surface était le siége d'actions chimiques, du genre de celles qui produisent les volcans; c'est ainsi qu'il expliquait l'accroissement de température avec la profondeur. Chaleur de la terre.

1359. Nous savons qu'il y a dans certains animaux une Chaleur animale; sa source principale.

source de chaleur qui maintient leur température au même degré, malgré les pertes continuelles par le rayonnement et le contact de l'air (865). Or, ces animaux, de même que des foyers en combustion, consomment une quantité considérable d'air, émettant continuellement comme eux de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique, en remplacement de l'oxigène absorbé. Il est évident, d'après cela, que la chaleur animale est due au moins en partie aux phénomènes chimiques de la respiration. Il n'y a pas de raison de croire que la formation de l'acide carbonique produise moins de chaleur dans ce cas que dans les autres; en partant de là, on trouve que la moitié au moins de la chaleur animale s'explique par la formation de ce gaz; terme moyen, c'est les six dixièmes. L'acide carbonique dégagé ne représente pas tout l'oxigène qui disparaît; en admettant que le reste soit employé à former de l'eau, on retrouve encore environ deux dixièmes, de sorte que les phénomènes chimiques de la respiration rendent compte de plus des trois quarts de la chaleur animale. Ces résultats sont dus aux travaux de MM. Dulong et Despretz. Les animaux soumis aux expériences étaient enfermés dans une boîte en cuivre mince, entièrement plongée dans l'eau; à l'aide d'un gazomètre on faisait passer de l'air par dans la boîte; un autre gazomètre recevait l'air vicié qu'on analysait pour déterminer combien il avait disparu d'oxigène et combien il s'était formé d'acide carbonique. On calculait d'après cela la chaleur due aux actions chimiques (1329) et on la comparait à la chaleur réellement produite, dont on avait la mesure par l'échauffement de l'eau qui entourait la boîte. Les expériences duraient une ou deux heures. Pour n'avoir pas à tenir compte de la chaleur latente de la vapeur d'eau qui sort des poumons, l'air de la boîte où se trouvait l'animal était toujours saturé, de sorte que la vapeur se condensait dès qu'elle était expulsée et donnait ainsi sa chaleur latente à l'appareil.

Réfutation des objections. 1360. Brodie, en comparant le refroidissement de deux animaux dont la moelle épinière était coupée, mais dans

l'un desquels on entretenait la respiration par l'insufflation, avait trouvé que celui-ci se refroidissait plus vite; d'où il avait conclu que la respiration était une cause de refroidissement plutôt qu'une source de chaleur. Legallois fit voir que le refroidissement dans ce cas tenait à ce qu'on insufflait dans la poitrine une énorme quantité d'air comparativement à celle qu'emploie l'animal pendant la vie; l'air en excès ne servait qu'à enlever de la chaleur. Chaussat, ayant observé que la température restait d'autant plus élevée que la section de la moelle était faite plus loin de l'occipital, avait conclu que la chaleur animale dépendait de l'influence nerveuse et non de la respiration. Mais il est évident que les effets qui suivent la section de la moelle à diverses hauteurs, tels que les modifications de la circulation, de la contraction musculaire, etc., influent sur les phénomènes chimiques eux-mêmes en changeant, par exemple, la quantité de sang qui traverse les poumons dans un temps donné. Tout ce qu'on peut conclure des expériences de Chaussat, c'est que la puissance nerveuse, sans doute par son influence sur la circulation, la nutrition, les sécrétions, etc., est en partie la source de la chaleur animale; mais d'après ce que nous venons de voir, la respiration est certainement la source principale. Une preuve encore bien évidente, c'est que la température des animaux est d'autant plus élevée qu'ils consomment plus d'air. Les reptiles et les poissons en consomment infiniment moins que les oiseaux et les mammifères; d'après les expériences de M. de Humboldt, la cinquante millième partie de ce qu'il faut à un homme suffit à une tanche. Spallanzani a constaté que les animaux hibernants, à sang chaud, tels que les marmottes, les chauves-souris, etc., se refroidissent graduellement à mesure que leur respiration diminue.

1361. On peut calculer approximativement la chaleur que produit l'homme en 24 heures. En prenant une moyenne entre les observations, on trouve qu'un homme qui respire 20 fois par minute, et qui à chaque inspiration prend 650 centimètres cubes d'air, fait disparaître 780 litres d'oxi- *Chaleur produite par l'homme.*

gène en 24 heures, pour produire 590 litres d'acide carbonique, et 218 grammes d'eau, répondant à la combustion de $0^k,323$ de carbon et $0^k,028$ d'hydrogène. Il se produit donc 2556 + 661 unités de chaleur (1329). Cette somme, d'après ce qu'on vient de voir, forme environ les trois quarts de la chaleur totale, qui s'élève par conséquent à 4025 unités; quantité suffisante pour faire bouillir $40^k,25$ d'eau prise à zéro, ou pour fondre $53^k,6$ de glace (1185).

§ III. *Théorie de la chaleur.*

La chaleur n'a pas de pesanteur appréciable.

1362. L'expérience prouve qu'un boulet chauffé jusqu'au rouge ne pèse pas plus que quand il est froid. Qu'on verse dans un flacon bouché à l'émeri de l'acide sulfurique et de l'eau, de manière à ne pas les mêler; qu'on pèse le flacon, puis qu'on agite; il se produira une énorme quantité de chaleur, et cependant le poids ne changera pas. Ces expériences et une foule d'autres montrent que la chaleur n'a pas de pesanteur sensible.

Analogie entre la chaleur rayonnante et du son.

1363. De même que le boulet dont nous venons de parler, un timbre suspendu au bras d'une balance, ne pèse ni plus ni moins quand il résonne. Le son qu'il produit se propage en tout sens, ainsi que la chaleur; et dans les deux cas l'intensité est en raison inverse du carré de la distance (673), (1242). Les rayons de chaleur et les rayons sonores se réfléchissent suivant les mêmes lois (669), (1253); les uns comme les autres, ils se transmettent à travers certaines substances et donnent à la surface qu'ils frappent la propriété de rayonner à son tour; en un mot, la chaleur et le son présentent tant d'analogie dans leurs propriétés qu'on doit naturellement admettre de l'analogie dans leur nature; or, le son consiste dans un mouvement vibratoire; il est donc rationnel d'expliquer aussi par un mouvement vibratoire les phénomènes de la chaleur.

Existence de l'éther.

1364. Il est certain que le mouvement vibratoire qui constitue la chaleur n'a pas besoin d'air pour se transmettre, ni d'aucune matière *pondérable* (1241). Nous sommes donc amenés à admettre, pour expliquer cette

transmission, une matière *impondérable*, remplissant ce que nous appelons le *vide*, soit dans les espaces célestes, soit entre les molécules des corps ; l'existence de cette matière, qu'on désigne sous le nom d'*éther*, est d'ailleurs aujourd'hui pleinement démontrée par les phénomènes de la lumière. On doit se représenter l'éther comme un fluide analogue aux gaz, mais d'une ténuité infiniment plus grande. Les phénomènes astronomiques montrent qu'il a si peu de densité que depuis des milliers d'années la résistance qu'il oppose aux planètes n'a pas produit d'altération sensible dans leur mouvement; mais il paraît que l'effet est appréciable sur les comètes, dont la substance est, comme on sait, au moins aussi légère que le vide qu'on obtient dans les machines pneumatiques. Il n'y a pas moyen de coercer l'éther dans un espace ou de l'empêcher d'y pénétrer, parce que les intervalles entre les molécules pondérables qui forment les parois d'un vase sont pour lui ce qu'une large ouverture serait pour l'air.

1365. La chimie fait voir que les derniers atomes de la matière pondérable, même dans les corps simples, ne restent pas isolés et sans liaison; ils se groupent en nombre déterminé pour former des assemblages qu'on ne peut plus détruire par des moyens mécaniques et auxquels par cette raison on conserve encore le nom d'atomes; mais pour éviter l'ambiguïté nous leur donnerons celui de molécules. On conçoit sans peine qu'une certaine quantité d'éther entre dans la constitution de chaque molécule, en lui formant une sorte d'atmosphère et en s'interposant entre les atomes qui la composent. Les phénomènes de l'optique montrent que l'éther, appartenant ainsi à chaque molécule, diffère notablement du fluide libre soit par sa densité, soit par son élasticité.

Sa disposition dans la matière pondérable.

1366. Voici maintenant l'idée que nous nous ferons, d'après M. Ampère, du mode de vibration qui constitue la chaleur. Dans le cas du son, chaque molécule fait ses vibrations en se déplaçant tout d'une pièce, sans que ni l'éther ni les atomes qui la composent aient de mouve-

Mode de vibration d'où résulte la chaleur.

ment relatif. Dans le cas de la chaleur, au contraire, ce sont les atomes et l'éther qui vibrent, le centre de gravité du système reste fixe. Nous pouvons nous figurer une molécule comme un timbre ou un diapason suspendu par un fil; les oscillations de cette espèce de pendule nous représenteront les mouvements par lesquels le son se produit, et les vibrations sonores seront une image des mouvements vibratoires qui produisent la chaleur. Nous savons qu'on pourrait faire vibrer le timbre par l'intermédiaire de l'air en produisant à une certaine distance un son semblable à celui qu'il peut rendre; il en est de même des molécules, par l'intermédiaire de l'éther; mais de plus elles peuvent prendre l'unisson d'un mouvement vibratoire quelconque, car l'expérience prouve que les corps s'échauffent sous l'influence d'une source quelconque. Nous avons vu en acoustique une propriété analogue dans les membranes, dans les masses d'air et dans la plupart des corps (736).

Température. 1367. Il est facile actuellement de concevoir la définition que nous avons donnée de la chaleur (830). Quant à la *température*, c'est par rapport à la chaleur ce qu'est l'*intensité* par rapport au son; de même que deux instruments de timbre différent et qui ne sont nullement d'accord peuvent donner des sons d'une intensité parfaitement égale, de même deux molécules tout-à-fait différentes peuvent, sans vibrer à l'unisson, se trouver à la même température, et produire en nous une sensation de chaleur également forte. On voit d'après cela que la température dépend de la vitesse de vibration (687), et même qu'elle a pour mesure le carré de cette vitesse (673) (812); si donc on désigne par v, v', v'',.. les vitesses maximum de vibration des différents points matériels, la température sera représentée par $v + v'^2 + v''^2 +$ etc.

Quantité de chaleur. 1368. La *quantité* de chaleur dépend à la fois de la vitesse de vibration et de la quantité de matière qui vibre. Nous prendrons pour sa mesure, en chaque point, le produit de la masse vibrante par le carré de sa vitesse maximum, produit connu en mécanique sous le nom de

force vive, et qui a la propriété remarquable de rester constant lors de la communication des mouvements vibratoires. Ainsi la chaleur contenue dans un corps peut être représentée par la somme $mv^2 + m'v'^2 + m''v''^2 +$ etc. Il est évident que deux corps, qui sont à la même température, peuvent ne pas contenir la même quantité de chaleur si les masses vibrantes sont différentes. Il en est dans ce cas comme de deux instruments qui donnent des sons d'égale intensité, avec des masses vibrantes différentes; dans un instrument à vent, par exemple, cette masse est si faible que le son cesse immédiatement; au contraire, dans une cloche, la vibration continue un certain temps, de sorte qu'en définitive la force vive transmise à l'air est plus considérable dans ce dernier cas que dans l'autre.

1369. Les tables des chaleurs spécifiques donnent la mesure de la masse vibrante dans les différents corps pris à poids égal (1145). On voit que cette masse est en général très petite dans les corps très lourds, de sorte qu'elle dépend plutôt du volume que du poids; elle est la même dans les molécules des corps simples solides, malgré la différence de nature et de poids (1150). Il y a aussi égalité pour les molécules des gaz simples, mais la valeur absolue est moindre (1161). On peut conclure de là et des résultats relatifs aux gaz composés (1167), que la masse qui vibre pour produire de la chaleur est plutôt de la matière impondérable que de la matière pondérable, et qu'en tout cas la partie vibrante ne doit pas être confondue avec la masse totale. Chaleur spécifique.

1370. Si on mesure le volume d'un corps échauffé on le trouve plus grand, par la même raison qu'on trouverait une corde plus épaisse pendant sa vibration transversale ou une tige plus longue pendant qu'elle vibre longitudinalement (742). Il est évident que la répulsion entre les molécules voisines doit devenir plus forte, au moins par intervalles, lorsque la distance diminue par l'amplitude des vibrations. L'usage qu'on fait des changements de volume pour mesurer les températures est fondé sur ce qu'il y a Changement de volume.

une liaison nécessaire et constante dans chaque substance entre le volume et la vitesse de vibration.

Changements d'état.

1371. Dans un solide la vitesse de vibration de chaque molécule ne peut pas dépasser certaines limites; il y a telle amplitude de vibration qui est incompatible avec la distance et la liaison actuelle des parties. Il arrive donc un moment où il y a séparation, de même qu'il y a rupture dans les corps sonores quand la vibration devient trop énergique; de là le passage à l'état liquide; le passage à l'état gazeux s'explique de même. Dans tous les cas, on conçoit qu'il puisse y avoir rupture dans les molécules mêmes dont les atomes se groupent ensuite dans un ordre différent, compatible avec l'état de vibration où ils se trouvent. Ce fractionnement des molécules, ou même un simple changement de forme peut rendre compte des anomalies qu'on observe dans la dilatation de certains corps (895), (902).

Chaleur latente.

1372. Si les atomes pondérables qui entrent dans la composition des molécules étaient complétement immobiles, la masse à mouvoir se réduirait à l'éther, et il est évident que dans ce cas il faudrait moins de force vive pour élever un corps à une température donnée. Or, quand on empêche un gaz de se dilater, à mesure qu'on l'échauffe, on gêne plus ou moins les mouvements des atomes. On conçoit donc qu'il faille moins de chaleur alors pour produire la même variation de température (1163). Réciproquement, en comprimant un gaz, les atomes pondérables dont on limite les excursions réagissent plus fortement sur l'éther, de sorte que la température s'élève. Les choses se passent alors à peu près comme quand on tend une corde pendant qu'elle vibre; le son qu'on entendait à peine se renforce aussitôt.

En général, les phénomènes de la chaleur latente dépendent de la force vive absorbée ou rendue par les atomes pondérables. Lorsqu'on échauffe de la glace prise à zéro, toute la force vive qu'on introduit est employée à mettre les atomes pondérables en vibration et dans une disposition nouvelle qui est incompatible avec l'état so-

lide, de sorte que la masse reste à zéro en se liquéfiant; la force vive est ensuite restituée peu à peu à l'éther, lors du changement d'état en sens inverse.

1373. On conçoit la propagation de la chaleur dans l'éther par analogie avec la propagation du son dans l'atmosphère; il est facile d'après cela de définir un rayon de chaleur (811). La transmission se fait à peu près de même dans certains corps où l'éther interposé diffère peu de l'éther libre; c'est le cas des corps diathermanes. Il n'y a pas d'échauffement sensible dans ce cas, parce que le mouvement vibratoire passe presque en entier d'une tranche à l'autre. Au contraire, dans les substances athermanes, une partie notable de la force vive reste dans les molécules; c'est en cela que consiste l'*absorption* de la chaleur. Même dans les corps diathermanes il y a toujours une absorption assez forte à la surface, à cause du changement de densité. La *réflexion* de la chaleur provient de la vibration qui s'établit alors, non pas dans les atomes pondérables, mais dans la couche superficielle de l'éther, de sorte que, comme la propagation, elle peut avoir lieu sans qu'il en résulte d'échauffement. On conçoit d'après cela pourquoi les corps athermanes qui absorbent le moins de chaleur sont ceux qui en réfléchissent le plus (1255).

Propagation de la chaleur.

Absorption.

Reflexion.

1374. Lorsque deux surfaces à la même température n'émettent pas la même quantité de chaleur, il faut conclure que les masses vibrantes sont différentes, précisément comme pour la chaleur spécifique. Il n'est pas étonnant, d'après cela, de voir les métaux rayonner moins que les autres substances. L'égalité des pouvoirs rayonnant et absorbant se conçoit aussi très bien dans la théorie actuelle de la chaleur; puisque la force vive ne se détruit pas (1370), une molécule doit évidemment rendre autant qu'elle a reçu.

Pouvoir rayonnant.

1375. Le refroidissement d'une molécule par le rayonnement se fait par le même mécanisme que l'affaiblissement du son d'un timbre suspendu dans l'air. Chaque vibration produit une onde qui parcourt le fluide en laissant en repos la partie qu'elle a traversée, mais dans laquelle

Refroidissement par rayonnement.

l'onde suivante vient à son tour produire du mouvement. A chaque vibration la force vive de la molécule diminue de toute la force vive qui passe dans l'onde, de sorte que les pertes successives vont en diminuant avec l'intensité des ondes produites. La formule de Dulong (1322) donnerait la mesure de la force vive perdue à chaque instant.

Conductibilité. 1376 La propagation de la chaleur dans un corps, par le rayonnement de molécule à molécule (1291), est analogue à la propagation du mouvement vibratoire entre des corps sonores qui ne se touchent point et entre lesquels l'air sert de moyen de communication. En général l'affaiblissement est très remarquable dans ce cas; il faut que le premier corps vibre très fortement pour influencer sensiblement le dernier; de plus, l'effet n'a lieu qu'au bout d'un temps assez long, qui dépend d'ailleurs de la distance, du nombre et de la nature des intermédiaires. On voit d'après cela que les phénomènes de la conductibilité pour la chaleur rentrent naturellement dans la théorie des mouvements vibratoires.

Production de la chaleur. 1377. Enfin, si on passe en revue les différents moyens de produire de la chaleur, tels que les actions chimiques, le frottement, etc., on verra qu'ils se réduisent en définitive à des opérations où les atomes doivent prendre des mouvements vibratoires plus ou moins énergiques, ce qui confirme encore la théorie dont nous venons de donner une idée.

FIN DE LA SECONDE PARTIE.

ÉLÉMENTS

DE PHYSIQUE.

Librairie de Germer Baillière.

COURS DE CHIMIE ÉLÉMENTAIRE, avec ses principales applications aux arts, par A. BOUCHARDAT, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu de Paris, agrégé de la Faculté de médecine de Paris. 1 fort volume in-8, de 850 pag. avec 4 pl., représentant les instruments de chimie. 9 fr.

NOUVEAUX ÉLÉMENTS D'HISTOIRE NATURELLE, comprenant la zoologie, la botanique, la minéralogie et la géologie, par A. SALACROUX, docteur en médecine de la Faculté de Paris, professeur d'histoire naturelle au Collége royal de Saint-Louis. 1839, deuxième édition entièrement refondue. 1 fort volume grand in-18, de 1070 pages, avec 48 pl. gravées sur acier, et représentant 450 sujets. 7 fr.

SALACROUX. Nouveaux éléments d'histoire naturelle, comprenant la zoologie, la botanique, la minéralogie et la géologie. 2 forts volumes in-8 de 1500 pages, avec 48 planches gravées sur acier et représentant 450 fig. Paris, 1839. 17 fr.

Le même ouvrage, fig. coloriées. 40 fr.

Cette édition in-8 a été faite concurremment avec la deuxième édition gr. in-18. De plus, comme on a été moins gêné par le défaut d'espace, on a conservé tous les passages qu'on a été obligé de supprimer dans l'in-18. Enfin, on a ajouté plusieurs détails qu'on avait été forcé d'omettre complétement dans le format in-18, à cause de l'âge des élèves auxquels ce dernier est destiné.

MANUEL COMPLET DU BACCALAURÉAT ÈS-SCIENCES PHYSIQUES ET MATHÉMATIQUES, rédigé d'après le program. de l'Université, contenant l'arithmétique, la géométrie, la trigonométrie rectiligne, la trigonométrie sphérique, l'algèbre, la géométrie analytique, les éléments de statique, la physique, la chimie, la zoologie, la botanique, la minéralogie et la géologie; par G. AIMÉ, docteur ès-sciences, ancien élève de l'école normale, et A. BOUCHARDAT, docteur en médecine, agrégé de la Faculté de médecine de Paris, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu. 1838, 1 fort volume grand in-18 avec planch. 6 fr.

CAHIERS DE PHYSIQUE, DE CHIMIE ET D'HISTOIRE NATURELLE, à l'usage des élèves de philosophie, rédigés d'après le nouveau programme de l'Université pour le Baccalauréat ès-lettres, par A. BOUCHARDAT, agrégé de la Faculté de médecine de Paris, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu. 1842, 3 vol. grand in-18 avec figures.

Chaque cahier, contenant une des trois parties complète, se vend séparément 2 fr. 50 c.

GIRARDIN ET LECOQ. Éléments de minéralogie appliquée aux sciences chimiques, ouvrage basé sur la méthode de M. BERZÉLIUS, contenant l'histoire naturelle et métallurgique des substances minérales, leurs applications à la pharmacie, à la médecine et à l'économie domestique, suivi d'un précis élémentaire de géognosie. 1837, 2 vol. in-8, fig., br. 7 fr.

PELLETAN. Traité élémentaire de physique générale et médicale. 3e édition revue et augmentée, 1838, 2 vol. in-8, avec fig. 14 fr.

Paris. — Imprimerie de BOURGOGNE et MARTINET, rue Jacob, 30.

ÉLÉMENTS

DE PHYSIQUE

PAR C. C. PERSON,

Docteur en médecine, docteur ès-sciences, agrégé à l'Université pour les sciences physiques et mathématiques, agrégé à la Faculté de médecine de Paris pour la physique, membre de l'Académie royale des sciences, belles-lettres et arts de Rouen et de Nancy, professeur de physique de la ville et du collége royal de Rouen.

TROISIÈME PARTIE.

PARIS

GERMER BAILLIÈRE, LIBRAIRE-ÉDITEUR,

RUE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE, N° 17.

LIBRAIRIE CLASSIQUE DE POILLEUX,

QUAI DES AUGUSTINS, N° 57.

Montpellier, CASTEL ET SEVALLE. | Londres, BAILLIÈRE, 219, Regent Street.
Strasbourg, DÉRIVEAUX ET LEVRAULT. | Lyon, SAVY, 49, quai des Célestins.

1841.

Différentes circonstances auraient encore pu retarder la publication de cette troisième et dernière partie, si M. le docteur Bouchardat, cédant à mes sollicitations, n'avait consenti à se charger d'une part dans le travail. Tout ce qui regarde le Magnétisme et l'Électricité lui appartient; quant à moi, j'ai rédigé ce qui regarde la Lumière.

PERSON.

Ce 25 mars 1841.

Quand je me suis engagé à rédiger, pour les Éléments de physique de M. le docteur Person, ce qui a rapport au Magnétisme et à l'Électricité, je n'avais pas prévu la difficulté de la tâche que je m'étais imposée; et j'avoue que si je n'avais pas été soutenu par le désir d'obliger un ami, j'aurais été bien vite arrêté par la conviction de mon insuffisance. Tant de découvertes se sont rapidement succédé depuis quarante ans dans cette partie de la science où Volta, Davy, Ampère, MM. Faraday et Becquerel, se sont illustrés, qu'on doit éprouver un grand embarras pour en présenter un bon résumé. M. Becquerel, il est vrai, a, dans son grand ouvrage sur l'Électricité et le Magnétisme, réuni les matériaux dont cette science se compose; aussi je n'ai pas manqué de puiser souvent dans cette mine féconde; mais la difficulté était de distinguer et de coordonner d'une manière élémentaire les

faits les plus importants; je me suis aidé pour cela des meilleurs Traités de physique, et parmi eux je dois distinguer celui de M. Biot, qu'on ne saurait trop méditer; le Cours de physique de l'École polytechnique par Dulong et M. Lamé, si remarquable par sa clarté et son exactitude; les Éléments de physique de M. Pouillet, qui contiennent l'exposition des recherches si intéressantes de l'auteur sur l'électricité, et enfin les ouvrages de MM. Despretz, Péclet, Pelletan, etc. Je n'ai pas besoin d'ajouter que j'ai profité des nombreux matériaux qui se trouvent dans la collection des Annuaires du bureau de longitudes, dans les Annales de chimie et de physique, et dans les Mémoires et les Comptes-rendus de l'Académie des sciences.

BOUCHARDAT.

Paris, 1er juin 1841.

ÉLÉMENTS
DE PHYSIQUE.

LIVRE SEPTIÈME.

OPTIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

PRODUCTION, PROPAGATION ET INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE.

§ Ier. *Production de la lumière.*

1378. On donne le nom d'*optique* à la partie de la physique qui traite de la lumière. La lumière, comme nous le verrons, consiste dans un mouvement vibratoire analogue à celui qui produit la chaleur, avec cette différence cependant que l'un de ces mouvements affecte tous nos organes, tandis que l'autre n'est perçu que par l'œil. **Définitions.**

1379. Si nous passons en revue les diverses sources de lumière, nous retrouvons presque toutes celles que nous avons signalées en étudiant la chaleur (1339–1358). Il nous suffira d'après cela d'examiner quelques cas remarquables. **Sources de lumière.**

Nos appareils d'éclairage se réduisent, comme on sait, à des foyers de combustion; mais tous les combustibles ne s'emploient pas indifféremment pour l'éclairage; on préfère ceux qui brûlent avec flamme, et surtout avec une flamme blanche. Il est à remarquer que dans ce cas le vif éclat de la lumière tient à la présence d'un corps solide. Ainsi dans un bec de gaz, l'hydrogène brûle de préférence; le charbon qui résulte alors de la décomposition devient incandescent dans la flamme proprement dite; il ne brûle que plus haut, ou quelquefois se répand en fumée dans l'atmosphère. Le même **1° Combustion.** **Éclat de la flamme dû à des corps solides.**

la flamme se brûle dans les différents cas plus ou moins promptement; il fournit nécessairement moins de lumière s'il se transforme immédiatement en gaz carbonique. La meilleure disposition du bec et du courant d'air est celle où le charbon reste le plus long-temps possible dans la flamme, avec toute son incandescence, en finissant cependant par y brûler, car il ne faudrait pas qu'il allât se disperser en fumée.

1381. Une haute température suffit sans action chimique pour produire de la lumière; cela est évident pour les substances qu'on fait simplement rougir au feu. En général un corps solide devient lumineux, du moins dans l'obscurité, dès qu'il atteint une température de 5 à 600°. On doit à M. Pouillet des expériences qui donnent une idée de la relation entre la température et l'éclat lumineux; les températures ont été déterminées avec un thermomètre à air dont le réservoir était en platine. **2° Température élevée.**

Rouge naissant.	525°
Rouge sombre.	700
Cerise naissant.	800
Cerise.	900
Cerise clair.	1000
Orangé foncé.	1100
Orangé clair.	1200
Blanc.	1300
Blanc éclatant..	1400
Blanc éblouissant...	1500 à 1600.

M. Becquerel a trouvé 1400° pour la température de l'extrémité de la flamme bleue de l'alcool, et 1600° à la pointe bleue qu'on obtient sur une chandelle avec le chalumeau.

1382. La *phosphorescence* est la propriété qu'ont certains corps d'être lumineux dans l'obscurité sans chaleur sensible, ou du moins à des températures peu élevées. La lumière dans ce cas est due à une action chimique très lente ou à l'électricité, de sorte qu'il ne s'agit point là d'une source nouvelle; cependant le phénomène est remarquable, surtout parce qu'il établit l'indépendance de la chaleur et de la lumière. On distingue deux sortes de phosphorescences; celle qui s'établit d'elle-même, et celle qu'on ne produit qu'à l'aide **3° Phosphorescence. — spontanée.**

de quelque préparation. Le phosphore proprement dit, le lampyre ou ver luisant, le bois humide dans un certain état de décomposition, les eaux de la mer dans certaines circonstances, nous offrent la phosphorescence spontanée. Dans tous ces cas il y a une action chimique, la présence de l'oxigène est nécessaire. Dans le lampyre, la phosphorescence est jusqu'à un certain point sous l'influence de la volonté; mais on la produit malgré l'animal, dès qu'on porte la température à 30 ou 40°, et cet effet a lieu même après la mort.

On sait que la phosphorescence de la mer se manifeste après une journée chaude; la lumière se montre à la crête des vagues, sur la route du vaisseau, et en général partout où l'eau est agitée : le phénomène est dû à une matière organique intimement mêlée avec l'eau, et qui a besoin du contact de l'air pour luire. Quant à l'origine de cette matière, elle est évidente quand on observe que les poissons, et surtout les poissons de mer, deviennent phosphoriques quand ils arrivent à un certain degré de décomposition. Mais en outre il existe dans les mers équatoriales de petits zoophytes qui, en nageant à la surface de l'eau, laissent après eux des traînées de lumière. MM. Quoy et Gaimard, à qui l'on doit cette observation, ayant placé deux de ces animalcules dans un bocal, les virent en peu d'instants rendre l'eau toute lumineuse.

Phosphorescence artificielle.

1383. Si on excepte les liquides et les gaz, presque tous les corps peuvent être rendus phosphorescents par différents moyens, dont les principaux sont la chaleur, l'insolation, les actions mécaniques, et les décharges électriques. Nous indiquerons seulement quelques expériences relatives aux trois premiers moyens. Qu'on expose des morceaux de spath fluor sur une pelle chaude sans être rouge, on les verra briller long-temps d'un vif éclat dans l'obscurité. Une infinité de substances, la craie, l'ambre, la farine, surtout celle de maïs, le papier, les os, les coquilles, etc., jouissent de la même propriété à des degrés divers. Le sulfate de quinine en morceaux bien secs devient lumineux quand on le chauffe dans un matras; la chaleur de l'eau bouillante suffit. L'insolation donne au spath d'Islande la propriété de briller dans l'obscurité. Il en est de même de certains diamants, de certains échantillons de craie, et de presque toutes

les substances organiques bien desséchées, comme le prouvent les expériences de Beccaria.

Le phosphore de Bologne, qui est du sulfure de baryum préparé en calcinant une pâte faite avec le sulfate de baryte et la gomme adragante, présente après l'insolation une lueur très vive pendant l'obscurité et qui dure des journées entières. D'après les expériences de M. Chevreul, cette lueur est due à une action chimique que la lumière met en activité ; la présence de l'air n'est pas nécessaire. On a des phénomènes analogues avec les phosphores de *Baudouin* (nitrate de chaux fondu), de *Homberg* (chlorure de calcium), de *Canton* (sulfure de calcium), et ceux qu'on prépare en faisant rougir des écailles d'huîtres calcinées avec le réalgar ou les sulfures d'antimoine et de mercure.

On sait que les actions mécaniques, comme la percussion, le frottement, la compression, rendent lumineuses plusieurs substances. Nous citerons la craie, l'oxide de plomb et d'étain, qui donnent une vive lumière quand on les frappe à coups de marteau sur l'enclume. C'est au frottement des poussières sur le canon qu'est due la lueur du fusil à vent tiré dans l'obscurité; aussi a-t-on un très beau jet lumineux quand on emploie une bourre chargée d'un peu de sable. Si on frappe la variété de feldspath appelée *adulaire*, de manière à former des fissures dans la masse, il se développe dans chacune d'elles une lumière qui dure plusieurs minutes. Si on la broie dans un mortier de porcelaine à coups vivement répétés, elle paraît toute en feu. Le sucre, le borax, quand on les casse dans l'obscurité, deviennent lumineux même sous l'eau. M. Dumas a remarqué que l'acide borique fondu dans un creuset de platine se fend par le refroidissement en jetant une vive lumière qui suit la direction des fentes. On observe souvent une lueur de peu de durée dans le clivage de certains minéraux, du mica par exemple. Un cas bien remarquable de phosphorescence vient d'être signalé par M. Henry Rose, dans l'intérieur même d'un liquide : qu'on mette 12 ou 15 gramm. d'acide arsénieux *vitreux* dans un matras de verre blanc avec 15 parties d'eau et 50 parties d'acide chlorhydrique non fumant ; qu'on fasse bouillir pendant un quart d'heure et qu'on laisse refroidir très lentement ; on aura une émission très sensible de lumière pen-

dant la cristallisation, si l'expérience est faite dans une chambre obscure ; il y a même une espèce d'éclair quand on agite le matras. On augmenterait les effets en opérant sur des quantités plus considérables : il ne se dégage plus de lumière une fois que la cristallisation est achevée. Les cristaux obtenus appartiennent à la modification *opaque* de l'acide, de sorte que le phénomène paraît dû à l'électricité produite par le changement de forme.

4° Éclairement. 1384. La lumière qui frappe un corps lui donne la propriété d'être lumineux à son tour ; c'est, par exemple, le cas de la lune et des planètes. Un corps éclairé devient ainsi une source de lumière, comme une masse d'air ébranlée par une influence devient un corps sonore. Dans les cas ordinaires, le rayonnement secondaire s'éteint, du moins pour nos yeux, dès qu'on arrête la source primitive ; mais il y a certains cas de phosphorescence par insolation qui feraient croire que le phénomène peut avoir une durée sensible. La surface de la lune, qui est frappée par un soleil sans nuage pendant plus de 200 heures consécutives, doit peut-être une partie de son éclat à une phosphorescence de ce genre. Quoi qu'il en soit, un corps pendant qu'il est éclairé se comporte comme un corps lumineux par lui-même ; il rayonne de toutes parts, et donne aux surfaces qu'il éclaire la propriété de rayonner à leur tour. La *chambre noire* (1389) nous montrera plus nettement encore ces phénomènes qu'une expérience journalière nous fait connaître déjà. Nous remarquerons que les corps les plus transparents sont susceptibles d'être éclairés, et de devenir ainsi des sources secondaires de lumière : un rayon du soleil peut se voir *latéralement* dans l'eau, dans le verre ; l'air lui-même frappé du soleil devient lumineux par influence : il est certain que s'il ne nous envoyait pas de lumière, le fond du ciel nous semblerait aussi noir dans le jour que dans la nuit. L'éclat de l'atmosphère est même comparable à celui de la lune, qui pendant le jour tranche à peine sur la voûte céleste ; c'est à l'éclairement de l'atmosphère qu'est dû le crépuscule.

§ II. *Propagation de la lumière.*

Définitions. 1385. En optique, on appelle *milieu*, tout espace où la lu-

mière peut se propager ; le vide (1364), l'air, l'eau, le verre, etc., sont des milieux. Par *rayon*, il faut entendre simplement une ligne suivant laquelle se propage la lumière.

1386. Mille expériences démontrent que dans le vide ou dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite ; le fait est bien évident, par exemple, quand le soleil pénètre par un trou dans une chambre obscure ; la poussière qui flotte dans l'air rend alors le rayon visible de toutes parts. Une bougie qu'on regarde à travers un tube ne se voit pas si le tube n'est pas droit. On sait que le procédé ordinaire pour prendre des alignements, vérifier une règle, etc., est fondé sur ce que la lumière ne passe d'un point à un autre qu'en suivant la droite qui joint ces deux points. **Propagation de la lumière en ligne droite.**

1387. La forme géométrique des ombres est une conséquence de la propriété qu'a la lumière de se propager en ligne droite. A proprement parler, l'ombre d'un corps est l'espace où ce corps empêche la lumière de pénétrer ; par exemple, l'ombre d'un bâton PN, planté verticalement, n'est pas seulement la ligne PO, c'est l'espace NPO que limite la droite NO menée par le bord supérieur du soleil ; il est certain en effet que cet espace ne peut recevoir aucun rayon. Ordinairement ce qu'on appelle l'ombre, n'est que l'intersection de l'ombre par une surface. **Ombre.** **Fig. 346.**

1388. On sait que les ombres des corps exposés au soleil ne sont jamais parfaitement tranchées ; le bord est entouré d'une *pénombre* dont il est aisé de concevoir la formation. Ici, par exemple, les points situés au-delà de O voient une partie de plus en plus grande du soleil, de sorte qu'en O' le disque entier est visible si S'N'O' passe par le bord inférieur ; l'espace OO' doit donc présenter une gradation insensible depuis l'ombre pure jusqu'à l'éclairement complet, et c'est en cela que consiste la pénombre. Il n'y aurait pas de pénombre si le corps éclairant se réduisait à un point. **Pénombre.**

1389. C'est encore par la propagation de la lumière en ligne droite qu'on se rend compte du phénomène de la *chambre noire*. Si, dans une chambre bien fermée à la lumière, on fait au volet un trou de 2 ou 3 centimètres, on verra sur la muraille opposée, que je suppose blanche, une peinture renversée des objets extérieurs avec toutes leurs **Chambre noire simple.**

couleurs, surtout si le soleil les éclaire. Avec un trou plus petit, la peinture sera plus nette et suffisamment éclairée, si on la reçoit à peu de distance sur un carton blanc. On reconnaîtra ainsi sans peine que la grandeur de l'image est proportionnelle à la distance au trou. Pour concevoir ces phénomènes, imaginons une flèche AB, placée en dehors de la chambre et bien éclairée ; chacun de ses points envoie de la lumière de toutes parts : de l'extrémité A, par exemple, part, entre autres, un rayon qui traverse le trou, et va frapper la muraille en *a*, où il se trouve ainsi un petit espace éclairé, qui est la peinture du point A. Le point B vient de même se peindre en *b*, et de même pour les points intermédiaires. On voit que si la peinture n'a pas une netteté parfaite, c'est que chaque point de l'objet est rendu dans l'image non par un point, mais par une petite surface qui est d'autant plus large que le trou est plus grand. Nous trouverons par la suite un moyen de perfectionner cette chambre noire, mais dans sa simplicité elle nous donnera encore plusieurs faits intéressants à noter.

Fig. 347.

La forme du trou est indifférente.

1390. Nous remarquerons, par exemple, que l'image n'est pas *sensiblement* altérée quand, au lieu d'un trou rond, on prend un trou carré ou triangulaire. Si le soleil est dans le *champ* de la chambre noire, on aura un disque rond sur le carton dans ce cas comme dans l'autre. Il faut cependant pour cela que l'image soit reçue à une certaine distance; de près, l'influence du trou se fait sentir. L'explication est, du reste, très simple. Si le trou se réduisait à un point, l'image du soleil serait évidemment un cercle, en supposant que le carton ne soit pas oblique. Maintenant si, au lieu d'un point, il y en a une infinité formant un carré, par exemple, nous aurons sur le carton une infinité de cercles lumineux, dont les centres formeront la projection du trou. Or, on n'a qu'à décrire, avec une ouverture de compas un peu grande, une infinité de cercles, en prenant successivement pour centres tous les points d'un petit carré, on verra que la figure totale est elle-même sensiblement un cercle. Ce qui rend l'irrégularité encore moins visible, c'est qu'il y a une pénombre sur les bords.

Ce que nous venons de dire explique pourquoi, sous un feuillage que le soleil éclaire, on aperçoit sur le sol des ta-

ches lumineuses arrondies, quoique les intervalles des feuilles qui laissent passer les rayons du soleil soient fort irréguliers. Il est évident que chaque intervalle est comme le trou d'une chambre noire, et que les taches lumineuses sont des images du soleil. Si elles sont elliptiques, c'est que le plan qui les reçoit n'est pas perpendiculaire aux rayons. Pendant une éclipse, toutes ces taches deviennent des croissants, ce qui n'a rien d'étonnant, puisque la chambre noire représente les objets tels qu'ils sont au dehors.

Remarque sur l'éclairement.

1391. De ce que dans la chambre noire les images reçues sur un carton blanc sont visibles de toute part avec leurs couleurs naturelles, nous pouvons conclure que les surfaces *blanches* éclairées par une lumière d'une couleur quelconque ont la propriété d'envoyer de toutes parts des rayons de cette même couleur. Cela n'a plus lieu avec les autres surfaces; la peinture, par exemple, devient fausse sur un carton rouge ou bleu, et il n'y a pas d'image sur un fond d'un noir mat comme le velours. Sur un papier blanc huilé ou sur un *verre dépoli* l'image est visible par transparence, ce qui nous montre que le rayonnement des points éclairés se fait alors en arrière comme en avant.

Absorption de la lumière.

1392. Quand la lumière se propage dans un autre milieu que le vide, il y a toujours une certaine perte; c'est en cela que consiste l'*absorption*. Les substances les plus transparentes absorbent une quantité très notable de lumière quand l'épaisseur est considérable. Si nous regardons impunément le soleil couchant, c'est que ses rayons ont à traverser une épaisseur d'air de plus de 200 lieues. D'après les expériences de Bouguer, une couche horizontale d'air de 7469 toises absorbe un tiers de la lumière; une couche d'eau de mer de 10 pieds en absorbe 2/5; un morceau de verre à glace de 3 pouces en absorbe la moitié.

Loi de l'absorption.

1393. Il est infiniment probable que ce que nous avons dit de l'absorption de la chaleur (1272) s'applique à la lumière; cependant, par approximation, on admet que si un rayon a perdu la moitié de son intensité en traversant une certaine épaisseur, ce qui reste éprouvera encore une perte de moitié en traversant une épaisseur pareille. En partant de cette loi, on résout aisément diverses questions relatives à l'absorption. Représentons par 1 la lumière qui pénètre dans la

substance transparente, par n la fraction qui sort de la première couche dont nous supposons l'épaisseur égale à l'unité ; la fraction qui sortira de la seconde couche sera n^2, et en général n^e représentera la lumière l qui aura traversé l'épaisseur e. Si, par exemple, pour une épaisseur de 1 mètre on admet que la lumière ait perdu $\frac{1}{100}$, on aura pour l'intensité après 10 mètres $\overline{0,9}^{10} = 0,304$, ou les $\frac{3}{10}$ environ. Calculons l'épaisseur e de la couche d'air capable d'absorber $\frac{1}{100}$ de la lumière, nous avons alors $n^e = 0,99$; mais les expériences de Bouguer donnent $n^{7469} = \frac{2}{3}$; donc $e = 7469 \dfrac{\log 100 - \log 99}{\log 3 - \log 2} = 185$ toises.

Opacité, transparence.

1394. On peut dire qu'à la rigueur toutes les substances sont opaques, puisqu'en augmentant l'épaisseur, on finit par ne plus laisser sortir qu'une quantité insensible de lumière. D'un autre côté, toutes les substances finissent par devenir transparentes quand on les réduit en lames très minces ; ainsi à travers une feuille d'or on voit très bien le disque du soleil, et même des objets bien moins brillants. Il est évident d'après cela qu'il n'y a rigoureusement ni substances transparentes, ni substances opaques, mais seulement des substances qui absorbent plus ou moins facilement la lumière, et qui, suivant l'épaisseur, constituent les corps opaques et les corps transparents.

Transparence de la flamme.

1395. L'épreuve ordinaire pour reconnaître si un corps est transparent consiste à regarder à travers ; mais ce moyen laisse quelquefois du doute : par exemple, on voit fort mal les objets à travers la flamme d'une bougie, mais c'est parce que des rayons faibles font peu d'impression quand ils frappent l'œil en même temps que des rayons intenses. En réalité la flamme est transparente ; Rumford l'a démontré en faisant voir que deux bougies placées l'une derrière l'autre éclairent autant que quand on les place de front (1409). L'ombre d'une bougie au soleil est aussi légère que celle d'une lame de verre. C'est sur la transparence de la flamme qu'est fondé l'emploi des becs à mèches concentriques, dernièrement introduits dans la construction des grands phares.

Vitesse de la lumière.

1396. Pour terminer ce qui se rapporte à la propagation de la lumière, il nous reste à parler de sa vitesse. Cette vitesse est si grande que les anciens ont cru que la trans-

mission de la lumière était instantanée; c'était encore l'opinion de Descartes. Galilée fit des tentatives inutiles pour mesurer cette vitesse; il avait établi des fanaux sur des points distants de quelques lieues; ces fanaux étaient d'abord cachés par des écrans; Galilée en enlevait un, puis l'observateur placé à l'autre station enlevait l'autre dès que les rayons lui étaient parvenus. Galilée espérait que la lumière mettrait un temps appréciable pour aller et revenir, mais il ne trouva jamais d'intervalle sensible entre le moment où il enlevait son écran, et le moment où les rayons partis de l'autre lumière venaient frapper son œil. **Essais de Galilée.**

1397. Roëmer, astronome danois, que Louis XIV avait fait venir en France, trouva enfin, vers 1675, un moyen de mesurer la vitesse de la lumière. Il avait remarqué que les éclipses de satellites de Jupiter retardaient de plus en plus à mesure que la terre s'éloignait de cette planète : il attribua naturellement ce retard au chemin plus grand que la lumière avait à parcourir. Supposons la terre en T, Jupiter en J et le soleil en S; si l'on note l'instant où le premier satellite *a* sort de l'ombre de la planète, on reconnaîtra que l'émersion suivante a lieu $42^h\ 28'\ 36''$ après. En si peu de temps, les positions relatives des trois astres ne changent pas sensiblement, de sorte qu'on a le droit de prendre l'intervalle entre les deux émersions pour la durée de la révolution du satellite, quel que soit du reste le temps que la lumière mette à venir de lui à nous. Avec les tables astronomiques, on peut assigner un mois après, par exemple, les positions de la terre, de Jupiter et de son ombre, puis, au moyen de la donnée précédente, calculer l'instant de la prochaine émersion. Or, si la distance J′T′ surpasse JT de 7 millions de lieues, on trouve un retard de 100″, qui est évidemment dû à ce que la lumière a 7 millions de lieues de plus à parcourir. On a un retard double ou triple si on attend que l'accroissement de distance soit doublé ou triplé, d'où il suit que le mouvement de la lumière est uniforme, et que la vitesse est de 70 mille lieues par seconde. Il s'agit ici de lieues de 25 au degré. **Procédé de Roëmer.** **Fig. 348.**

1398. Comme on se fait difficilement une idée d'une vitesse pareille, nous remarquerons qu'elle est 80 mille fois aussi grande que celle d'un boulet de canon. Un boulet qui con- **Comparaisons.**

serverait sa vitesse initiale de 390ᵐ, mettrait 17 ans à venir du soleil; la lumière arrive en 8 minutes 6 secondes. Il faudrait au moins 20 jours à l'oiseau le plus rapide pour faire le tour du globe; pour parcourir un égal chemin, $\frac{1}{7}$ de seconde suffit à la lumière : c'est à peu près le temps d'un battement d'aile.

Applications.

Aberration de la lumière.

1399. Quoique la vitesse de la terre dans son orbite ne soit que d'environ 7 lieues par seconde, elle produit, en se combinant avec la vitesse de la lumière, un déplacement apparent dans les astres, toutes les fois que nous ne marchons pas dans la direction même des rayons qu'ils nous envoient. C'est en cela que consiste le phénomène de l'*aberration* de la lumière. Bradley, astronome anglais, en déterminant cette aberration pour les étoiles, obtint en 1727 une nouvelle mesure de la vitesse de la lumière; son procédé est même considéré comme plus exact que celui de Roëmer. Les observations de Delambre sur les satellites donnent 69760 lieues; celles de Struve, sur les aberrations, donnent 69360; la différence n'est que la 174ᵉ partie de la valeur moyenne.

Distance des étoiles.

1400. Dernièrement, M. Savary, astronome à l'Observatoire de Paris, a imaginé de se servir de la vitesse de la lumière pour mesurer la distance des étoiles, du moins de celles autour desquelles on en voit une autre tourner. Pour se faire une idée du procédé, il faut observer que l'étoile satellite *paraît* mettre plus de temps à parcourir la moitié de son orbite où elle s'éloigne de nous, que la moitié où elle se rapproche. En nous supposant dans le plan de l'orbite, comme cas plus simple, la différence est évidemment le double du temps qu'emploierait la lumière à traverser le diamètre qui se trouve ainsi connu en lieues. L'angle sous-tendu par ce diamètre se mesure en observant l'étoile dans les plus grands écarts, de sorte qu'il ne reste plus qu'à déterminer la distance où il faut se placer, par rapport à une base connue, pour qu'elle sous-tende un angle donné, ce qui est un problème très simple de trigonométrie.

Vitesse de la lumière dans les différents milieux.

1041. La vitesse de la lumière dont nous venons de parler se rapporte seulement au vide; dans les autres milieux, il y a toujours un ralentissement plus ou moins considérable. Dans l'air, la différence n'est que de $\frac{1}{3400}$; mais pour l'eau, c'est environ $\frac{1}{4}$, pour le verre $\frac{1}{3}$, et pour le diamant plus de

moitié. Nous verrons plus loin comment on arrive à ces résultats; ce qu'on peut dire de plus général, c'est que le ralentissement dépend à la fois de la densité et de la combustibilité. Les exemples que nous avons cités montrent l'influence de la densité ; quant à l'autre cause, son influence est évidente, quand on observe que la lumière marche moins vite, par exemple, dans l'hydrogène bicarboné que dans l'oxigène, dans l'alcool ou l'éther que dans l'eau. L'hydrogène cependant, à cause de sa grande légèreté, reste de tous les corps celui où la lumière se propage le plus vite; les métaux, au contraire, sont ceux où elle marche le plus lentement.

§ III. *Intensité de la lumière.*

1402. L'œil, en comparant une lumière à une autre, est incapable de juger si l'intensité est double ou triple ; mais il peut reconnaître si l'intensité est égale, du moins quand il s'agit de deux lumières vues à la fois, ayant une intensité médiocre et la même couleur. **Axiomes de photométrie.**

1403. Les corps lumineux par eux-mêmes sont en général trop brillants pour que l'œil fasse les comparaisons avec exactitude ; on préfère juger de l'intensité par l'éclairement produit sur une surface blanche, et on admet que cet éclairement est proportionnel à l'intensité de la source, c'est-à-dire qu'il deviendrait double ou triple, si la lumière donnée par la source était doublée ou triplée.

1404. Nous admettrons encore comme un principe évident, que l'effet de plusieurs lumières (plusieurs bougies, par exemple) est la somme des effets dus à chacune séparément. Tels sont les trois axiomes sur lesquels repose la *photométrie* ou l'art de mesurer la lumière.

1405. Il est facile, avec ces principes, d'établir la loi du décroissement de la lumière suivant la distance. Plaçons au devant d'un écran E E′ une bougie b à 1^m et, 4 bougies pareilles en un faisceau B à 2^m; mettons près de l'écran une tige opaque T, de manière à avoir 2 ombres b' B′ très voisines; nous trouverons que ces ombres sont également foncées : or, l'une b' est éclairée *seulement* par le faisceau B, et l'autre B′ *seulement* par la bougie b. Il faut donc 4 bougies **L'intensité est en raison inverse du carré de la distance.** **Fig. 349.**

à 2^m pour produire le même effet qu'une seule à 1^m; par conséquent l'effet d'une bougie portée à une distance double est réduit au quart ; on prouverait de même qu'il est réduit au neuvième à une distance triple, de sorte que si l'intensité est i à la distance 1, elle est $\frac{i}{4}$ à la distance 2, $\frac{i}{9}$ à la distance 3, et en général $\frac{i}{d^2}$ à la distance d.

Remarque. 1406. On se rend compte de cette loi en observant que les rayons émanés d'un centre lumineux se répartissent sur une surface quadruple quand la distance est double, de sorte qu'il en tombe alors quatre fois moins sur l'unité de surface. Cela suppose, du reste, qu'il n'y a pas de perte dans le trajet.

Autre énoncé de la loi. 1407. On donne à la loi précédente un énoncé qui s'applique plus facilement dans certains cas. Il est clair que le soleil, par exemple, s'il était à une distance double, nous présenterait un diamètre moitié moindre, et par conséquent une surface quatre fois plus petite; l'éclairement, d'après la loi précédente, serait alors quatre fois moindre (1303). On voit également qu'une bougie à 1^m a la même surface *apparente* que 4 bougies à 2^m, et nous savons que l'éclairement est alors le même. On peut donc dire que l'éclairement produit par un corps lumineux à différentes distances est proportionnel à sa surface apparente. Par surface apparente nous entendons, comme on le voit, la projection de la surface réelle sur la concavité d'une sphère d'un rayon quelconque, ayant le point éclairé ou l'œil de l'observateur pour centre. Cet énoncé donne immédiatement la mesure de l'éclairement d'un corps placé contre le soleil même : cet astre se projetterait alors sur un hémisphère entier ; la surface apparente serait 92 mille fois ce qu'elle est maintenant, et on aurait par conséquent une lumière 92 mille fois aussi forte qu'à la surface de la terre.

Influence de l'obliquité sur le rayonnement. 1408. Dans la surface apparente, nous ne tenons compte ni des saillies ni des enfoncements, et nous en avons le droit, du moins par approximation, parce qu'*à une certaine distance, on ne distingue plus sur une surface lumineuse ni enfoncements ni saillies*. Aussi, dans une barre de fer incandescente, on ne distingue plus à 2 ou 3^m ni faces

ni arêtes ; on ne reconnaît plus la forme des charbons dans une fournaise ; le soleil, la lune, nous semblent des disques plats. A une certaine distance, il en est de même d'un boulet rouge ou de ces globes dépolis dont on entoure les lampes. Du reste, pour qu'il en soit ainsi, il faut que la surface soit uniformément lumineuse, ce qui arrive bien rarement quand elle n'est pas lumineuse par elle-même. Nous avons vu (1246) que l'obliquité des surfaces avait sur le rayonnement de la chaleur la même influence que nous venons de signaler pour la lumière.

1409. Le procédé le plus généralement employé pour comparer deux lumières, est le procédé des ombres dont nous avons déjà parlé (1405). Soit, par exemple, une lampe B et une bougie b, dont je représenterai l'intensité par 1 ; si pour l'égalité des ombres la lampe doit être à une distance double, son intensité est 4 ; si la distance est triple, l'intensité est 9 ; d'où l'on tire cette règle : Cherchez combien de fois la grande distance D contient la petite d ; le quotient carré $\frac{D^2}{d^2}$ donnera l'intensité cherchée. Je trouve, par exemple, qu'un lampe à double courant d'air éclaire autant à 6^m qu'une bougie à 2 ; j'en conclus que son intensité $\frac{36}{4}$, c'est-à-dire 9 fois aussi grande que celle de la bougie, ou qu'elle équivaut à 9 bougies. Il est à remarquer que l'addition d'un globe de verre dépoli ne trouble pas sensiblement l'égalité des ombres.

Procédé de Rumford pour comparer deux lumières. Fig. 349.

1410. Pour l'exactitude du procédé, il faut avoir soin d'exclure toute lumière étrangère. Les rayons qui éclairent chaque ombre doivent tomber sous le même angle, et le mieux est de les faire tomber perpendiculairement. Il faut que les ombres se touchent ; la comparaison est alors plus facile. L'écran doit être d'un blanc mat et modérément éclairé. Rumford employait de préférence un écran demi-transparent, la comparaison des ombres se faisait par derrière. Les résultats de ce procédé deviennent incertains quand il y a une grande différence de teinte entre les deux lumières, comme cela a lieu, par exemple, entre une chandelle et un bec de gaz. On peut alors se servir d'une bougie comme terme commun de comparaison. Les grandes pénombres (1388) sont une cause d'erreur ; on les évite en mettant

Précautions.

les grandes lumières très loin. D'ailleurs, il faut faire plusieurs expériences en variant les distances, et prendre un résultat moyen.

Résultats photométriques.

1411. Par le procédé que nous venons d'indiquer, on a reconnu que 4 becs ordinaires de gaz éclairaient comme 5 lampes de Carcel, ou comme 6 quinquets brûlant 42 gramm. d'huile par heure; qu'un bec de gaz équivalait à 10 bougies de 5, ou à 12 chandelles de 6 à la livre.

Éclairage par la cire et le suif.

1412. On suppose ici les chandelles et les bougies donnant le plus grand éclat possible. Même pour une bougie, suivant l'état de la mèche, la lumière peut varier dans le rapport de 100 à 60. Pour une chandelle, les variations sont énormes, comme le montrent les résultats suivants dus à Rumford.

Représentons l'intensité de la lumière que donne la chandelle bien mouchée par 100

En 11 minutes, cette intensité sera réduite à . . . 39

En 19 minutes, à 23

En 29 minutes, à 16

Cette diminution tient d'abord à ce que la mèche trop longue est comme un pilier opaque interceptant les rayons que la transparence de la flamme eût laissé passer (1395). Quand de plus la mèche sort de la flamme, elle agit sur celle-ci comme un corps froid qu'on y plongerait; la combustion alors se fait mal. Amené par l'action capillaire à une hauteur où la température est peu élevée, le suif incomplétement décomposé s'échappe en grande partie à l'état de fumée.

Éclairage à l'huile.

1413. Une amélioration capitale dans l'éclairage à l'huile a été l'introduction des lampes *à double courant d'air*, où la flamme ayant la forme d'un double cylindre creux se trouve en contact avec un courant d'air en dedans et en dehors. Argand, qui prit un brevet en 1783, en est considéré comme l'inventeur; mais long-temps avant, Meusnier, de l'Académie des sciences, se servait de lampes pareilles dans son laboratoire pour remplacer les fourneaux; seulement la cheminée était en tôle au lieu d'être en verre. Le grand avantage de ces lampes tient à la grande surface de la flamme, et au tirage (628), qui met cette grande surface en contact avec un air continuellement renouvelé; de sorte que la

combustion est complète et sans fumée, même pour une très grande hauteur de mèche. Comme le tirage augmente avec la longueur de la cheminée, il y a de l'avantage à prendre des cheminées très hautes, du moins jusqu'à une certaine limite; car si le courant d'air devient trop rapide, le charbon brûle trop vite, et on ne profite pas de son incandescence (1380). L'expérience prouve en effet que pour une même hauteur de mèche, la flamme se raccourcit à mesure qu'on allonge la cheminée. Quand, au contraire, on diminue le tirage, la flamme s'allonge, mais elle finit par rougir et fumer; il faut donc une certaine hauteur de cheminée pour avoir le plus de lumière possible. Le coude de la cheminée, qui rétrécit le passage de l'air au niveau de la flamme, a une grande influence suivant la hauteur à laquelle il se trouve, comme on en a la preuve dans les nouvelles lampes où le verre peut monter et descendre. C'est du reste un perfectionnement heureux que d'avoir changé le coude des anciens verres en une courbure adoucie qui ne projette aucune ombre. Quand on veut avoir la plus forte lumière qu'une lampe puisse donner, il y a de l'avantage à ce que l'huile arrive en excès à la mèche; on augmente ainsi la lumière sans augmenter la dépense dans la même proportion. Cette modification, due à Carcel, est maintenant introduite dans plusieurs espèces de lampes (553, 558); la consommation pour les dimensions ordinaires est alors de 42 grammes à l'heure.

1414. C'est encore à l'aide du procédé des ombres qu'on est arrivé à déterminer les conditions pour brûler le gaz avec la plus grande lumière possible. Nous avons déjà vu combien il était avantageux de donner une grande hauteur à la flamme (1380); il y a aussi un avantage très grand à faire sortir le gaz par une rangée de trous de manière que les jets lumineux se confondent. Ainsi en comparant la lumière d'un simple jet avec celle d'un bec ordinaire, on trouve qu'à dépense égale elles sont dans le rapport de 100 à 150 dans les circonstances les plus favorables pour chacune d'elles. C'est d'après les expériences de Christison et Turner qu'on règle aujourd'hui tout ce qui regarde la construction des becs. Pour le gaz de la houille dans les becs d'Argand, les trous ont $\frac{1}{37}$ de pouce (mesures anglaises). On en met 20 dans un

Éclairage au gaz.

cercle de 1 pouce de diamètre ; le gaz sort sous une pression de 1 pouce d'eau à peu près.

Équivalents d'éclairage. 1415. 110 litres du gaz de la houille, et 30 litres du gaz de l'huile, dont les densités sont 0,42 et 0,95, donnent en une heure la même lumière que 42 grammes d'huile dans une lampe de Carcel. Terme moyen, on brûle par heure 140 litres du gaz de la houille, et 38 litres du gaz de l'huile.

Voici, d'après Rumford, les poids des diverses substances qu'il faut brûler pour obtenir une même quantité de lumière :

Cire d'abeille.	La bougie étant toujours bien mouchée.	100
Suif.	Chandelle bien mouchée. . .	101
	Chandelle avec une longue mèche.	229
Huile d'olives.	Dans une lampe d'Argand. . .	110
	Dans une lampe commune, à flamme large, claire et sans fumée.	129
Huile de navette.	Dans les lampes communes. .	125
Huile de lin.	Dans les lampes communes. .	120

Question d'économie. 1416. Tant qu'on n'a besoin que d'une faible lumière, l'élairage le plus économique est encore celui d'une mince chandelle, d'une lampe de Locatelli, ou d'une lampe à double courant à laquelle on donne très peu de mèche. En effet, de cette manière on ne paie que la lumière dont on a besoin ; mais il y aurait perte à multiplier les petits foyers pour obtenir beaucoup de lumière : l'avantage alors se prononce pour les lampes à déversement et surtout pour le gaz. C'est ce que montre bien le tableau suivant, calculé par M. Péclet.

Prix par heure d'une même quantité de lumière.

	cent.
Par le gaz.	3,9
Par une lampe de Carcel. . . .	5,8
Par de la chandelle de 6 à la liv. .	9,8
— de 8 à la liv.	12,0
Par de la bougie de 5 à la livre.	48,6

Le tableau suppose que le prix du bec de gaz est de cinq centimes par heure, mais quelques compagnies portent le prix à 6 centimes.

1417. Plusieurs physiciens ont comparé, par le procédé des ombres, les intensités des lumières naturelles et artificielles. Par exemple, pour déterminer le rapport entre la lumière du soleil et celle d'une bougie, Wollaston laissait pénétrer le soleil dans une chambre obscure (1389) par un très petit trou dont il connaissait le diamètre; mesurant ensuite l'image solaire, il avait la surface sur laquelle était répartie la lumière reçue par le trou. Il a trouvé ainsi que la lumière du soleil, réduite à $\frac{1}{5563}$, éclairait comme une bougie à un pied (anglais), ou bien, en d'autres termes, qu'il faudrait 5563 bougies, placées à un pied de distance, pour éclairer comme le soleil. Les résultats de Bouguer donneraient le nombre 5774, qui diffère peu du précédent. On trouve d'après cela qu'un papier à 4 millimètres d'une bougie, ou à 24 millimètres d'une lampe de Carcel, est éclairé à peu près comme au soleil. Il s'agit ici du soleil élevé à 30° au moins au-dessus de l'horizon.

Comparaison des lumières d'une bougie et du soleil.

1418. Wollaston a trouvé que la lune dans son plein éclairait comme une bougie à 12 pieds. De là il résulte que la lumière de la lune est environ huit cent mille fois plus faible que celle du soleil. En plein jour, le fond du ciel a presque le même éclat que la lune, puisque celle-ci se distingue à peine. La surface de l'hémisphère céleste étant 91 mille fois plus grande, il s'ensuit que la lumière d'un ciel parfaitement découvert est 91 mille fois plus forte que celle de la pleine lune, et environ 9 fois plus faible que celle du soleil. Notons que Bouguer a trouvé la lumière de la lune 2 ou 3 fois plus forte que ne l'indiquent les expériences de Wollaston.

— d'une bougie et de la lune.
— de la lune et du soleil.
— de la lune et du jour.
— du jour et du soleil.

1419. Quoique M. Arago regarde les observations de Bouguer comme fort peu sûres, voici, au moins comme approximation, le tableau qu'il a donné de l'éclat des astres à différentes hauteurs.

Mesure de la lumière absorbée par l'air.

Hauteur.	Eclat.	Hauteur.	Eclat.	Hauteur.	Eclat.
0°	6	5°	1201	30°	6613
1	7	10	3149	40	7237
2	192	15	4535	50	7624
3	454	20	5474	70	8016
4	802	25	6136	90	8123

On voit que l'éclat est environ 1200 fois plus faible à l'horizon qu'au zénith, mais il y a d'énormes différences suivant la pureté de l'air. La lumière que nous recevrions sans l'atmosphère est ici représentée par 10000, de sorte que l'atmosphère traversée perpendiculairement en arrête environ la cinquième partie.

CHAPITRE II.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

§ I. *Phénomène et lois de la réflexion.*

Phénomène de la réflexion

1420. Pour mettre le phénomène de la réflexion dans toute son évidence, on n'a qu'à faire tomber un rayon de soleil sur un miroir *métallique* dans une chambre obscure; en répandant un peu de poussière dans l'air, on verra la lumière changer brusquement de route à la rencontre de la surface, et le rayon *réfléchi* s'éloiguer en ligne droite en faisant un angle plus ou moins ouvert avec le rayon *incident* suivant l'inclinaison du miroir. Cet angle serait nul, et le rayon réfléchi retournerait directement à l'ouverture, si le miroir était perpendiculaire au rayon incident. Nous avons supposé un miroir métallique, parce qu'avec un miroir ordinaire le phénomène est plus compliqué, la réflexion se faisant non seulement sur l'étamage, mais aussi sur la première face de la glace. Généralement on ne fait pas attention à cet autre rayon réfléchi, mais il devient aussi brillant que le

premier pour de grandes obliquités ; et d'ailleurs comme les deux faces de la glace forment presque toujours un angle, les deux rayons réfléchis suivent des routes différentes, et il arrive même, quand le rayon incident est très oblique, qu'on distingue 6 ou 7 rayons réfléchis de plus en plus faibles (1421). On évite toute cette complication en enlevant l'étamage et en noircissant ou dépolissant la face postérieure de la glace. Quand la réflexion se fait ainsi sur une surface *plane*, on reconnaît que le rayon réfléchi conserve exactement la forme du rayon incident. Le verre à vitre, n'ayant jamais sa surface plane, ne donne qu'un rayon réfléchi très irrégulier.

Moyen de reconnaître une surface plane.

1421. On est tenté d'abord d'assimiler la réflexion de la lumière à celle des corps élastiques ; on s'imagine que pour qu'elle ait lieu il faut une surface douée d'une certaine résistance ; mais des expériences bien simples montrent que la lumière se réfléchit aussi bien sur l'air ou sur le vide, que sur les substances les plus denses. La seule condition nécessaire est la juxtaposition de deux milieux où la lumière n'ait pas la même vitesse (1401). Faisons tomber un rayon IM sur un prisme ABC ; nous pourrons le suivre dans l'intérieur du verre, et nous le verrons distinctement se réfléchir sur l'air en M. D'ailleurs, en regardant suivant RM, la face AC paraît brillante comme un miroir, et on y voit très bien les images des objets placés du côté de I. Ces phénomènes ont encore lieu quand on établit le prisme sur un récipient, et qu'on enlève l'air au-dessous de la face AC. On sait d'ailleurs qu'en regardant obliquement et par dessous, la surface de l'eau contenue dans un verre un peu large forme tout aussi bien un miroir que quand on regarde par dessus. La réflexion sur l'air explique encore les images multiples données par une glace ; il suffit de jeter les yeux sur la figure pour s'en rendre compte, remarquant seulement que l'écart des rayons réfléchis serait insensible, même pour les glaces les plus épaisses, si les faces étaient rigoureusement parallèles.

Condition essentielle du phénomène.

Fig. 350.

Fig. 351.

Fig. 352.

1422. Dans l'expérience avec le prisme, fig. 350, on verra en général une partie de la lumière sortir par la face AC sous la forme d'un rayon M*r* plus ou moins coloré. Nous ferons pour le moment abstraction de la coloration, mais

Réflexion totale.

nous observerons que quand le rayon incident fera dans le verre un petit angle avec la surface AC, aucune lumière ne sortira par cette face; tout se réfléchira, de sorte que le rayon MR présentera un éclat très vif. C'est en cela que consiste le phénomène de la *réflexion totale*. Quelle que soit l'obliquité, l'expérience prouve qu'il y a toujours une partie de la lumière qui pénètre de l'air dans le verre; ici, au contraire, nous voyons que pour une certaine obliquité la lumière ne peut plus passer du verre dans l'air, ou, en général, d'un milieu plus dense dans un milieu moins dense; car on aurait le même phénomène avec l'eau, avec le vide, etc. Ce fait capital doit nécessairement modifier l'idée trop mécanique qu'on se fait d'abord de la réflexion de la lumière. Nous aurons occasion d'y revenir.

Lois relatives à la direction du rayon réfléchi. Fig. 353.

1423. La direction du rayon réfléchi est soumise à deux lois très simples. Soit IM le rayon incident. Au point d'incidence M concevons la normale MN; le plan déterminé par les droites IM et MN contiendra le rayon réfléchi. Maintenant, pour avoir sa direction dans ce plan, il n'y a qu'à mener une droite MR faisant avec la normale le même angle que le rayon incident fait de l'autre côté. L'angle du rayon incident et de la normale s'appelle *angle d'incidence;* l'angle de la normale et du rayon réfléchi s'appelle *angle de réflexion;* on peut donc énoncer les deux lois de la manière suivante: 1° *le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan normal à la surface réfléchissante;* 2° *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.* Il est plus commode, dans certains cas, de compter les angles avec la surface; comme compléments des angles avec la normale; ils sont nécessairement égaux entre eux.

Démonstration. Fig. 354.

1424. Pour vérifier ces lois on établit, au centre d'un cercle gradué, un petit miroir métallique M, perpendiculaire à la fois au plan du cercle et au rayon MN, qui passe par le zéro de la division. L'appareil porte deux tubes mobiles I et R, dont les axes sont parallèles au plan du cercle, et aboutissent dans toutes leurs positions à un même point du miroir, vis-à-vis le centre. Les axes sont donnés par de très petits trous percés dans des diaphragmes ou par des fils croisés. Le cercle étant mobile dans son plan et autour d'un axe vertical, on fait aisément arriver un rayon, par un des

tubes; sous un angle quelconque, IMN, et on reconnaît alors que pour recevoir le rayon réfléchi il faut que l'axe du second tube fasse le même angle de l'autre côté de la normale MN. On voit du reste par la disposition de l'instrument, que le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfléchissante.

1425. Comme application, nous pouvons voir que le mouvement angulaire du rayon réfléchi est double de celui du miroir. Car, si par le mouvement du miroir il y a 1° de moins entre la surface réfléchissante et le rayon incident, il y aura 1° de plus entre cette surface et l'ancien rayon réfléchi. Pour l'égalité il faudra donc que celui-ci s'incline de 2°.

Mouvement relatif du miroir et du rayon réfléchi.

1426. Sous l'incidence perpendiculaire, le mercure, les glaces étamées, l'acier, les mirois à télescope, et en général les métaux blancs bien polis, réfléchissent un peu plus de la moitié de la lumière incidente; l'accroissement n'est guère que d'un huitième quand on passe à l'incidence la plus oblique possible. Au contraire, pour les substances peu réfléchissantes, l'obliquité a une très grande influence; l'eau, le verre, le marbre, renvoient environ $\frac{1}{40}$ de la lumière qui leur arrive perpendiculairement, tandis qu'ils la réfléchissent aussi bien que les métaux quand l'incidence est très oblique. Aussi observe-t-on qu'en regardant de plus en plus obliquement dans une glace étamée, la plus vive des deux images qu'on peut voir finit par être celle qu'on apercevait d'abord à peine, et qui est due à la réflexion sur le verre. L'influence de l'obliquité est encore très manifeste sur les surfaces mal polies en comparaison des miroirs; on peut voir l'image d'une bougie en regardant très obliquement sur une carte, sur un meuble, etc.

Intensité de la lumière réfléchie.

Voici, d'après Bouguer, la proportion de lumière réfléchie par diverses substances et pour différents degrés d'obliquité; les angles sont comptés avec la surface; l'intensité du rayon incident est représentée par 1000.

	Eau.	Verre à glace.	Marbre noir poli.
0° 30′	721		
1°	692		
2° 30′	614	584	
3° 35′			600

	Eau.	Verre à glace.	Marbre noir poli.
5°	501	543	
7° 30′	409	474	
10°		412	
10° 30′	333		
15°	211	299	156
20	145	222	
30	65	112	51
40	34	57	
50	22	34	
70	18	25	
90	18	25	23

Moyen de la mesurer. Fig. 355.

1427. Pour trouver le rapport entre la lumière incidente et la lumière réfléchie, d'après le procédé de Bouguer, on colle sur deux écrans opposés deux petits morceaux A A′ du même papier; on place la surface réfléchissante M de manière que son plan tombe perpendiculairement sur le milieu de la droite A A′, et on fait mouvoir une bougie B suivant cette droite jusqu'à ce que l'œil, placé en O, juge le papier A, vu dans le miroir, aussi éclairé que le papier A′ vu directement. Dans cette position, le carré de la grande distance A′ B représente la lumière incidente, et le carré de la petite A B représente la lumière réfléchie. En effet (1405), la lumière reçue par A, est $\frac{i}{\overline{AB}^2}$; celle reçue par A′, est $\frac{i}{\overline{A'B}^2}$. Ces quantités peuvent aussi représenter les lumières émises; mais la lumière émise par A est précisément la lumière incidente; celle émise par A′ a été trouvée égale à la lumière réfléchie; on a donc,

$$\frac{i}{\overline{AB}^2} : \frac{i}{\overline{A'B}^2} :: \text{lumière incid.} : \text{lum. réfl.} :: \overline{A'B}^2 : \overline{AB}^2.$$

Si, par exemple, A′B = 1^m,2 et A B = 0^m,8, on trouvera que la lumière réfléchie forme les $\frac{4}{9}$ de la lumière incidente, ou que son intensité est 444, celle de l'autre étant 1000. En faisant varier la distance de la surface réfléchissante, on déterminera le rapport pour différents degrés d'obliquité. On a soin d'écarter toute lumière étrangère, et d'intercepter par un écran E les rayons qui viendraient directement de la bougie au miroir ou à l'œil de l'observateur.

§ II. *Des miroirs plans et des instruments qui en sont formés.*

1428. Quand on connaît les lois de la réflexion, il est aisé de se rendre compte des phénomènes que présentent les miroirs plans. On sait que l'image d'un point lumineux paraît derrière le miroir à la même distance que l'objet en avant; cela vient de ce que tous les rayons partis du point lumineux prennent en se réfléchissant sur le miroir la même direction que s'ils provenaient d'un point placé symétriquement derrière. Soit A le point lumineux, MM' le miroir que nous supposons coupé perpendiculairement par le plan de la figure; menons la normale AM et prolongeons-la jusqu'en A' d'une quantité égale à elle-même; je dis qu'un rayon quelconque AB se réfléchit suivant une droite BR dont le prolongement passe par A'. En effet, si nous menons A'BR, la partie BR satisfait déjà à l'une des lois de la réflexion, puisqu'elle est dans le plan de la figure; elle satisfait aussi à la seconde, puisque les angles RBM' et ABM sont égaux. BR est donc la route du rayon réfléchi; on prouverait de même que tout autre rayon réfléchi paraît provenir de A'. **Image d'un point.** **Fig. 356.**

1429. Pour que l'image soit visible, il n'est nullement nécessaire que le point lumineux se trouve vis-à-vis le miroir; quand même la suface de celui-ci se réduirait à la portion BB', l'image serait encore visible comme auparavant pour un œil placé dans l'espace RBB'R' occupé par le rayon réfléchi et qu'on appelle pour cette raison *champ des rayons réfléchis.* Il est évident d'ailleurs que ce champ se rétrécit à mesure que l'objet s'éloigne ou qu'il s'écarte de la perpendiculaire menée au centre du miroir; cela explique pourquoi il est difficile de voir dans un petit miroir un objet éloigné et placé très obliquement; on manque le champ des rayons réfléchis si on ne met pas l'œil très près de la surface. **Champ des rayons réfléchis.** **Fig. 356.**

1430. Ce que nous avons dit du lieu de l'image d'un point lumineux (1427) s'appliquant à tous les points d'une surface, il résulte de la construction même que l'*image et l'objet sont symétriques par rapport au miroir.* On entend par là que l'image est égale et semblable à l'objet, et que ses parties ont la même situation, par rapport à la sur- **Image d'un objet.**



face postérieure du miroir, que les parties de l'objet par rapport à la surface antérieure. Par exemple, une glace renverse les lettres comme si on en tirait une contre-épreuve ou comme si on regardait le papier à l'envers ; il faut une seconde glace pour les redresser. Il semble dans un miroir qu'on écrive de la main gauche. L'image d'un objet horizontal est redressée par un miroir incliné de 45° ; la symétrie emporte en effet que l'image et l'objet feront le même angle avec le miroir. C'est par cette même raison que les arbres paraissent renversés dans la surface horizontale de l'eau, et en général le mouvement angulaire est moitié moindre par le miroir que par l'image. Il suffit qu'un miroir vertical ait la moitié de la hauteur de celui qui se regarde, pour qu'on s'y voie tout entier. En effet, soit AB la hauteur de celui qui regarde ; MM' un miroir indéfini ; A'B' l'image. Les rayons que l'œil situé en O reçoit des extrémités de l'image interceptent sur le miroir une hauteur ab, qui est précisément la moitié de AB, comme la géométrie le démontre aisément, en observant qu'on a AB = A'B' et MM = MA'. Les portions Ma, M'b, pourraient être enlevées sans que l'image cessât d'être vue dans toute sa hauteur, ce résultat est indépendant de la distance ; de sorte que si on voit le tiers de sa hauteur dans une glace, on n'en verra ni plus ni moins en l'éloignant ou en l'approchant.

Fig. 357.

Lorgnettes de réflexion. 1431. On conçoit qu'en plaçant au bout d'une lunette un miroir plus ou moins incliné, on pourra voir des objets vers lesquels la lunette ne sera pas dirigée ; on construit des lorgnettes d'après ce principe. Hévélius avait imaginé un instrument de ce genre qu'il appelait *polémoscope*, parce qu'il pouvait servir à voir sans danger à la guerre. Un premier miroir m donnait une image a' de l'objet a. Les rayons réfléchis par m tombaient sur un second miroir m', comme s'ils fussent venus de l'image a' ; on avait donc une seconde image a'' qui était droite, et qui, par une inclinaison convenable des miroirs, se retrouvait dans la direction même de l'objet. La *fausse lunette* avec laquelle les escamoteurs font voir à travers les corps opaques, se compose de 4 miroirs inclinés de 45°. Deux de ces miroirs sont cachés dans les tubes, et les deux autres dans le pied de l'instrument.

Polémoscope. Fig. 358.

Fausse lunette. Fig. 359.

1432. On sait qu'en se plaçant entre deux miroirs qui font un angle, on voit à droite et à gauche des images d'autant plus nombreuses que l'angle des miroirs est plus petit. Ces images, de plus en plus faibles, sont tournées alternativement dans un sens et dans l'autre, et paraissent rangées sur un arc de cercle ayant son centre à l'intersection des miroirs. Ce phénomène résulte évidemment des réflexions qui se font d'un miroir à l'autre, et il montre bien clairement qu'une image formée dans un premier miroir est, par rapport à un second miroir, absolument comme un objet. Le *kaléidoscope*, imaginé par Brewster, est une très jolie application de la propriété qu'ont les miroirs angulaires de multiplier les images. Deux glaces étroites, mais très longues, forment une espèce de gouttière dans un tube, dont un bout se termine par une boîte transparente contenant de petits morceaux de verre coloré. On regarde par l'autre bout, et l'arrangement irrégulier que prennent les petits morceaux de verre se trouve répété par les glaces de manière à former une figure d'une symétrie parfaite, sauf que l'objet reste toujours plus éclairé que les images. Soit ABC la section du tube; ACB l'angle des glaces; l'objet F donne dans CB une image F', qui est comme un objet par rapport à CA, ce qui produit l'image F''. On peut en dire autant de l'autre côté, d'où l'on voit que F'' est réellement la superposition de deux images. *En comptant l'objet* on a 4 figures pareilles, quand l'angle des miroirs est contenu 4 fois dans la circonférence; on en aurait 5 si l'angle était contenu 5 fois, et ainsi de suite. Dans les kaléidoscopes ordinaires, l'angle est de 60°, de sorte qu'on a 6 images. Pour avoir une symétrie parfaite même avec un objet irrégulier, trois conditions sont nécessaires : 1° que l'angle des miroirs soit une partie aliquote *paire* de la circonférence; 2° que l'œil reste au-dessus du point C, c'est-à-dire qu'il faut regarder à peu près suivant la ligne de jonction des glaces; 3° que l'objet soit dans la gouttière formée par les glaces. En effet, quand on ôte la boîte et qu'on regarde un objet éloigné, les parties correspondantes des images ne se raccordent plus.

Miroirs angulaires.

Kaléidoscope.

Fig. 360.

1433. La *chambre claire*, ou *camera lucida*, est un instrument qui, à l'aide de la réflexion, transporte l'image des objets sur le papier même où on veut les dessiner. Imaginons

Chambre claire.

Fig. 361.

une petite glace non étamée AB inclinée de 45°; pour un œil regardant verticalement; l'image des objets se projettera sur le papier PP′ placé sous la glace, en même temps on verra la pointe du crayon par transparence, de sorte qu'on pourra suivre tous les contours de l'image. La glace doit être à faces parallèles, sans quoi on aurait deux images. On la remplace si on veut par un très petit miroir d'acier de 2 ou 3 millimètres de large; en mettant l'œil tout près on a un champ assez étendu, et on voit en même temps le crayon par la partie de la pupille que le miroir laisse à découvert. Dans cette disposition l'image est renversée, mais il est facile de l'avoir droite en la renversant d'avance par un miroir mis en avant du premier. Ce miroir peut être un prisme DCE où la réflexion se fait sur l'air (1421), ce qui a le double avantage de donner beaucoup de lumière (1422) et une seule image. On peut encore faire les deux miroirs avec un seul prisme quadrangulaire ABCD; on place alors l'œil de manière à voir directement le crayon par une moitié de la pupille. Telles sont les parties essentielles; mais il y a plusieurs pièces accessoires pour fixer l'œil, tempérer la lumière, et surtout pour faire en sorte que l'image paraisse réellement sur le papier et non au-delà. La chambre claire a été imaginée par Wollaston, puis perfectionnée par Amici et par C. Chevalier, qui en exécute d'un usage très commode.

Goniomètre de Malus. 1434. Quand les faces d'un angle dièdre sont miroitantes, comme cela a lieu pour les prismes de verre, pour les cristaux, etc., on peut, par la réflexion de la lumière, mesurer l'angle bien plus exactement que par tout autre moyen. On arrive au résultat de plusieurs manières, mais voici une des plus simples. Au centre d'un cercle horizontal gradué on établit l'angle à mesurer de manière que l'arête soit verticale, et que la bissectrice AO passe à peu près par le centre. Avec une lunette L, on regarde dans la face AB l'image d'un objet *très éloigné* qu'on amène à la croisée des fils. Ayant fixé solidement la lunette dans cette position, au moyen d'une alidade l on fait tourner le prisme jusqu'à ce que l'image de l'objet soit vue dans la face AC; alors l'angle décrit par l'alidade est le supplément de l'angle cherché. En effet, soient OB et OC les perpendiculaires menées du centre aux faces de l'angle; pour que AC prenne la place de AB, il faut

Fig. 362.

que OC décrive l'angle COB qui est le supplément de A, puisque le quadrilatère a deux angles droits.

Il est clair que l'arête doit être verticale pour qu'on ait le droit de prendre la mesure de l'angle dans un plan horizontal. On est sûr de sa verticalité lorsqu'un objet vertical se voit vertical dans les deux faces, car alors on a deux miroirs verticaux dont l'intersection est nécessairement verticale. D'ailleurs une petite inclinaison n'entraînerait qu'une erreur infiniment petite. Si le centre n'est pas sur la bissectrice, la face AC ne pourra pas prendre la place de AB; mais les rayons incidents étant sensiblement parallèles puisque l'objet est très éloigné, la face AC ne les réfléchira suivant l'axe de la lunette qu'au moment où elle sera devenue parallèle à AB; or pour arriver là, il faut évidemment que la perpendiculaire AC décrive le supplément de l'angle A.

1435. Le goniomètre de Wollaston qui sert à mesurer les angles des très petits cristaux, est fondé sur le même principe; seulement il n'y a pas de lunette, et le plan du cercle est vertical. Le cristal est tenu en a par une petite pince mobile en tous sens. On met l'œil tout près de lui, et on regarde une ligne horizontale sur un édifice; l'œil ainsi fixé remplace la lunette. Profitant de la petitesse du cristal qui ne couvre pas toute la pupille, on fait en sorte que l'image d'une autre ligne horizontale vue sur une face coïncide avec la ligne qu'on regarde directement. Si l'autre face, quand on fait tourner tout l'appareil, donne le même résultat, on est sûr que l'arête est horizontale comme l'axe de rotation; et dès lors, la mesure de l'angle est dans le plan du cercle; mais celui-ci est ordinairement gradué de manière à donner immédiatement l'angle et non son supplément.

Goniomètre de Wollaston. Fig. 363.

1436. On appelle *horizon artificiel* un miroir horizontal dont on se sert pour trouver la hauteur des astres au-dessus de l'horizon. Un vase AB rempli de mercure donne un excellent horizon artificiel. On l'établit au devant d'un cercle gradué, et on mesure l'angle compris entre les rayons venant de l'astre et de son image; la moitié de cet angle est la hauteur cherchée. En effet, menons l'horizontale OH par le centre dans le plan du rayon direct EO et du rayon réfléchi CO, elle sera parallèle à l'intersection AB de la surface du mercure par ce même plan. En outre, à cause de

Horizon artificiel. Fig. 364.

la grande distance de l'astre, les rayons EO et EC peuvent être regardés comme parallèles; par conséquent l'angle de hauteur EOH = E'CA = OCB = HOC = ½ EOC. L'horizon artificiel fournit deux vérifications très importantes; 1° par cela même que la lunette dans son mouvement rencontre un objet et son image, on est sûr qu'elle décrit un plan vertical; la verticalité du cercle est ainsi vérifiée sans niveau et sans fil à plomb. 2° Si on fait décrire à la lunette la moitié de EOC, on est assuré que dans cette position son axe est horizontal; on détermine donc ainsi sur le cercle la position du diamètre horizontal.

Sextant. Fig. 365. 1437. Le *sextant*, dont on fait un usage continuel à bord des vaisseaux pour les observations astronomiques, a pour partie essentielle des miroirs disposés de telle sorte *qu'on voit à la fois les deux objets dont on veut mesurer l'angle*. C'est là le grand avantage des instruments de réflexion, et c'est ce qui rend les mesures possibles sur une base qui vacille sans cesse. S'il s'agit, par exemple, de prendre la hauteur du soleil, on vise à l'horizon par la lunette L, puis au moyen de l'alidade A on incline le grand miroir M jusqu'à ce qu'un rayon SM se réfléchisse sur le petit miroir *m*, et vienne passer dans l'axe de la lunette. Ce petit miroir *m* n'est étamé que sur la moitié de sa surface, afin qu'on puisse voir à la fois l'horizon par transparence et le soleil par réflexion. Quand on a mis ainsi le disque de l'astre en contact avec l'horizon, ou en général quand on a fait coïncider les deux objets, l'angle compris est donné par le double de l'angle BAM, décrit par l'alidade en partant du zéro; mais dans la division les demi-degrés étant comptés pour des degrés, on n'a qu'à lire tout simplement l'angle marqué sur le limbe. Pour concevoir ce mode de division et le jeu du miroir, il faut observer que quand l'alidade est sur le zéro, les deux miroirs sont parallèles; alors un rayon horizontal qui marcherait dans la direction O *m* redeviendrait horizontal, suivant MH, après la seconde réflexion. Maintenant, si on incline le miroir M de 1°, le rayon MH change seul de direction, et il se relève précisément de 2° (1425). Comme la marche de la lumière serait la même en sens inverse, on est sûr que le rayon renvoyé horizontalement dans la lunette vient d'un objet situé à 2° de hauteur, quand l'angle de l'ali-

dade est réellement de 1°. Le *cercle de réflexion* et l'*équerre de réflexion* sont fondés sur les mêmes principes. L'idée des instruments de réflexion appartient à Newton, mais c'est Halley qui fit exécuter le premier instrument de ce genre : il lui donna le nom d'octant, parce que c'était un huitième de cercle; l'octant fut long-temps en usage.

1438. On doit à *Sgravesande* un instrument appelé *héliostat*, à l'aide duquel un rayon de soleil se trouve réfléchi toute une journée, si l'on veut, dans une direction fixe, malgré le mouvement continuel de l'astre, ce qui donne tout le loisir de faire des expériences. L'héliostat, simplifié d'abord par Charles, l'a été plus encore par Gambey, qui en outre l'exécute avec une précision dont les anciens instruments n'approchent pas. Concevons un cercle EE′ qui, par le moyen d'une horloge, tourne en vingt-quatre heures autour de l'axe PP′, parallèle à l'axe du monde, et dans le sens du mouvement apparent du soleil. Soit PS une espèce d'aiguille exactement dirigée vers le centre du soleil; PM une tige à laquelle on peut donner telle direction qu'on veut, et qui ensuite reste fixe; M un miroir *perpendiculaire au plan du triangle* PSM. Ce miroir est terminé par une queue Q, parallèle à sa surface, et qui est soutenue en S par une douille mobile en tout sens. Par construction, les distances PS et PM sont égales, de sorte que le triangle PSM reste toujours isocèle, quelle que soit sa base SM. Si maintenant nous concevons un rayon de soleil S′M tombant en M sur le centre du miroir, je dis que MR, prolongement de PM, sera la direction du rayon réfléchi. En effet, 1° *le rayon réfléchi passe par le point d'incidence M*; 2° *il est dans le plan du triangle isocèle* SPM; car ce plan, qui est par construction normal au miroir, contient déjà le rayon incident, puisque celui-ci passe par un point M, et se trouve parallèle à une droite SP située dans ce plan. 3° *Il fait avec la surface réfléchissante un angle égal à l'angle* PMS, *qui est adjacent au miroir*; car PMS est égal à PSM, et PSM, comme alterne interne, est égal SMS′, qui est l'angle d'incidence. Ainsi le rayon central se réfléchit suivant le prolongement du côté fixe du triangle isocèle, et les autres rayons qui tombent sur le miroir prennent aussi la même direction puisqu'ils sont tous parallèles. Or l'aiguille

Héliostat.

Fig. 366.

PS tourne avec le cercle EE′, en conservant la même inclinaison par rapport à son plan; elle est donc constamment dirigée vers le centre du soleil, et le raisonnement que nous venons de faire pouvant se répéter pour toutes les positions, on voit que le rayon réfléchi doit rester fixe comme la tige PM dont il est le prolongement. Ainsi toute l'opération pour disposer cet héliostat se réduit à diriger l'axe PP′ suivant l'axe du monde, et à tourner l'aiguille PS vers le centre du soleil : c'est ce que les pièces accessoires de l'instrument permettent de faire avec une exactitude parfaite. Tournant ensuite et inclinant à volonté la tige PM, on a un rayon réfléchi qui reste fixe dans la position qu'on lui a donnée.

Miroirs plans comburants. 1439. On conçoit que si on dirige sur un même point les rayons du soleil réfléchis par un grand nombre de miroirs, on devra produire une température très élevée; et c'est sans doute là le moyen dont se servit Archimède, s'il est vrai qu'au siége de Syracuse il ait mis le feu à la flotte de Marcellus. *Kircher*, en visitant les lieux, a jugé que les vaisseaux n'étaient pas à plus de 150 pieds des murs de la ville; or Buffon, avec un appareil formé de miroirs plans, a enflammé des pièces de bois à des distances au moins aussi grandes. Voici quelques uns de ses résultats; ses miroirs avaient 6 pouces sur 8, la largeur du foyer était à peu-près de 16 pouces.

Nombre des miroirs.	Distance de l'objet.	Effet produit.
21	20 pieds.	Inflammation de planches de hêtre déjà charbonnées.
45	20	Fusion d'un morceau d'étain pesant 6 livres.
117	150	Fusion de l'argent en lames minces.
128	150	Planche de sapin goudronnée mise subitement en flammes.
154	250	Morceaux de sapin soufrés et mêlés de charbon, mis en flammes.
224	40	Assiette d'argent mise en fusion.

§ III. *Des miroirs courbes et des instruments qui en sont formés.*

1440. Chaque élément d'une surface courbe pouvant être considéré comme un petit plan, on prévoit que chaque rayon, considéré individuellement, doit s'y réfléchir suivant les mêmes lois que sur une surface plane; et en effet tous les résultats que cette prévision indique sont confirmés par l'expérience.

Réflexion sur les surfaces courbes.

1441. On partage les miroirs courbes en concaves et en convexes. Dans les premiers on se voit plus grand que nature, c'est le contraire dans les autres; avec les premiers on peut concentrer les rayons du soleil, avec les autres on les disperse. Les miroirs courbes qu'on rencontre le plus ordinairement sont formés par un disque de verre plan d'un côté et convexe ou concave de l'autre, la face convexe étant étamée, la surface réfléchissante, qui est réellement l'étamage, se trouve concave; au contraire, quand la face étamée est concave, on a un miroir convexe. Mais les grands miroirs de ce genre se font avec des glaces courbées dont on étame l'une ou l'autre face, suivant l'espèce de miroir qu'on veut obtenir. Tous ces miroirs étamés ont le défaut de donner deux images; aussi ne s'en sert-on pas dans les télescopes. Comme cas plus simple nous supposerons toujours la surface réfléchissante à nu, comme cela a lieu dans les miroirs métalliques, qui seraient bien préférables s'ils pouvaient conserver long-temps leur poli.

Différentes espèces de miroirs courbes. — concaves. — convexes. — étamés. — métalliques.

1442. Les miroirs ardents sont de grands miroirs concaves qui réfléchissent les rayons du soleil de manière à les concentrer dans un très petit espace; les meilleurs sont en glace étamée. *Bernières*, à qui l'on doit le moyen de courber les glaces pour cet usage, en avait fait un de 3 pieds et demi de diamètre, qui fondait le fer en quelques secondes: la largeur du foyer était d'un demi-pouce environ, de sorte que sa surface était 7000 fois plus petite que celle du miroir: en admettant une perte de moitié par la réflexion, on voit que la concentration de la chaleur allait à 3500 fois. Villette et Tchirnhausen ont fait des miroirs ardents métalliques de 4 à 5 pieds de diamètre. Il est à remarquer qu'un petit mi-

Miroirs ardents.

roir à barbe, ou même la boîte d'une montre suffisent pour allumer de l'amadou; ce qui exige une température d'environ 300°.

Miroirs sphériques.

1443. On appelle miroirs *sphériques* ceux dont la surface réfléchissante a une courbure sphérique, soit convexe, soit concave; ce sont, du reste, les plus usités et ceux qu'on travaille avec le plus de perfection. Ils sont ordinairement circulaires, de sorte qu'ils ont un centre qu'il ne faut pas confondre avec le centre de courbure ou centre de la sphère à laquelle leur surface appartient. Dans ces miroirs, on appelle *axe principal*, une droite indéfinie qu'on imagine par le centre du miroir et le centre de courbure; mais en général toute droite passant par le centre de courbure prend le nom d'axe, lors même qu'elle ne rencontre pas le miroir.

Axe principal.

Axe en général.

Foyer des rayons parallèles. Fig. 367.

Relation entre la longueur focale et le rayon de courbure.

1444. Si un faisceau de rayons parallèles tombe sur un miroir sphérique concave, il est facile de démontrer que les rayons les plus voisins de l'axe viendront avec la réflexion se couper en un même point qui sera précisément le milieu F du demi-diamètre parallèle aux rayons. Tout se réduit à prouver qu'un rayon *quelconque* SM vient après la réflexion passer par le point F; or, si nous menons CM, nous avons la normale au point d'incidence, et il n'y a plus qu'à voir si FMC est égal à l'angle d'incidence SMC; pour cela observons que M étant par hypothèse très près de A, FM diffère infiniment peu de FA, de sorte que le triangle FMC peut être regardé comme isocèle; mais l'angle en C est égal à l'angle d'incidence comme alterne interne; donc SMC et FMC, égaux chacun à l'angle C, sont égaux entre eux.

Le point F s'appelle *foyer des rayons parallèles* ou simplement *foyer*; c'est, comme on voit, *le point où les rayons parallèles les plus voisins de l'axe viennent se croiser après la réflexion.* La distance au miroir s'appelle aussi très souvent *foyer;* ainsi on dit un miroir de 2 pieds, de 3 pieds de foyer; la longueur du foyer caractérise chaque miroir, puisqu'elle est précisément la moitié du rayon de courbure.

Détermination par l'expérience.

1445. Pour trouver le foyer d'un miroir, il n'y a qu'à le tourner directement vers le soleil, et chercher le point où les rayons réfléchis s'entre-croisent. Cette méthode est fondée sur ce que les rayons qui partent d'un point du soleil sont

sensiblement parallèles; il n'y a pas parallélisme entre les rayons qui partent de différents points; aussi se forme-t-il réellement une infinité de foyers dont l'ensemble constitue une petite surface circulaire, mais on peut ne considérer que le centre.

1446. Quand le miroir a une courbure très prononcée (et à défaut de miroir on peut se servir du fond d'un vase bien poli ou d'une simple feuille de fer-blanc), on observe que les rayons réfléchis s'entre-coupent ailleurs qu'au foyer; les intersections forment une surface qu'on peut rendre visible avec un peu de poussière ou en y promenant une bande de papier. On reconnaît ainsi que la section de cette surface par un plan normal au miroir donne deux courbes adossées FX, FY qu'on appelle *caustiques*. Les caustiques sont plus brillantes vers le foyer F, parce que les intersections deviennent plus nombreuses et plus serrées. D'après la forme des caustiques, il est évident que les rayons éloignés de l'axe viennent le couper entre le foyer et le miroir; mais il faut que la courbure du miroir soit très forte pour que le point de croisement s'éloigne notablement du foyer, de sorte qu'avec les miroirs ordinaires on peut supposer sans erreur sensible que tous les rayons qui tombent sur la surface viennent se croiser au même point. On trouve par le calcul, que si l'arc AM est de 1°, le rayon réfléchi en M coupe l'axe à 0m,49994 du miroir, en supposant le rayon de courbure égal à 1m; la distance au véritable foyer n'est donc alors que la vingt-cinq millième partie du rayon. Si AM = 10°, l'intersection est à 0m,49229 du miroir, de sorte que la distance est fort notable; mais le miroir aurait alors 20° de courbure, et ceux des télescopes n'en ont guère que 4 ou 5.

Caustiques. Fig. 368.

Aberration de sphéricité.

1447. Le raisonnement pour la détermination du foyer s'applique aussi bien à un axe oblique qu'à l'axe principal; si donc le miroir n'est pas tourné directement vers le soleil, il faut s'attendre à trouver le foyer sur l'axe CA' parallèle aux rayons et au milieu du demi-diamètre CA'. On voit ainsi qu'il y a un foyer différent pour chaque inclinaison du miroir; chaque axe a le sien, même quand il ne rencontre pas le miroir; cependant quand il en passe trop loin, le foyer peut manquer, puisqu'il n'y a plus de réflexion pour les rayons voisins de l'axe. Dans ce cas, et en général dans le cas d'une grande obliquité, une

Foyer des axes obliques. Fig. 369.

portion de la surface caustique commence à se manifester sous la forme d'une tache lumineuse allongée du côté du miroir.

Image réelle d'un point.

1448. Quand on a un point lumineux devant un miroir concave *à une distance plus grande que le foyer*, les rayons divergents qui vont frapper le miroir se réfléchissent encore de manière à passer par un même point où il se manifeste une image brillante qu'*on peut recevoir sur un verre dépoli* ou même regarder comme un objet en plaçant l'œil à une certaine distance dans le prolongement des rayons qui se sont croisés; c'est là ce qu'on appelle une image *réelle* dont le caractère est d'être formée par le croisement *réel* des rayons.

Formule qui donne la position de l'image.

1449. Il est évident par la raison de symétrie que cette image doit toujours se trouver sur l'axe passant par le point lumineux; quant à sa position sur cet axe, elle est donnée par la formule très simple $oi = 1$. Pour bien concevoir cette formule et en même temps la vérifier par expérience, imaginons qu'on tende un fil MN qui représente l'axe du miroir; portons sur cet axe le foyer MF autant de fois qu'il y sera contenu, écrivant o en F et 1, 2, 3, etc., aux divisions suivantes; enfin marquons les points 1/4, 1/3, 1/2, 3/4 et 4/3. Ces dispositions prises, nous constaterons aisément que si un point lumineux est mis successivement en 1, 2, 3, 4, l'image se trouve en 1, 1/2, 1/3, 1/4; qu'elle est en 3/4 quand il est en 4/3, et qu'en général, pour avoir la distance i de l'image au foyer, il faut prendre la réciproque de la distance o de l'objet, c'est-à-dire qu'on a $i = \frac{1}{o}$ d'où $oi = 1$. Remarquons bien que cette formule suppose qu'on prend le foyer du miroir pour unité de longueur.

Fig. 370.

Marche de l'image.

1450. Il est facile maintenant de suivre la marche de l'image; si l'objet est à l'infini, l'image est au foyer; elle s'en éloigne à mesure que l'objet s'en approche, mais la marche de l'image est bien plus lente que celle de l'objet; la première ne parcourt qu'une division quand l'autre est venu d'une distance infinie. En 1 l'image et l'objet se rencontrent, et à partir de ce point les mouvements sont échangés, de sorte que l'objet arrivant en o, l'image est à l'infini, ce qui signifie que les rayons émanés du point F sont rendus parallèles par le miroir. On voit qu'à plus forte raison la réflexion ne peut pas les faire converger quand le point lumi-

neux est entre le foyer et le miroir, de sorte qu'alors il n'y a plus de croisement *réel*, ni par conséquent d'image *réelle* à espérer.

1451. Pour établir la formule $oi = 1$, considérons un rayon ON émané du point lumineux O; soit NI le rayon réfléchi; C étant le centre de courbure, CN sera la normale au point d'incidence; cette normale est bissectrice de l'angle ONI, d'où l'on conclut par un théorème de géométrie, que: ON : NI :: CO : CI. Si le rayon est très voisin de l'axe, on a sensiblement ON = OM, et NI = MI, donc Démonstration de la formule. Fig. 371.

$$MF + FO : MF + FI :: FO - FC : FC - FI$$

ou

$$F + O : F + I :: O - F : F - I$$

d'où $OI = F^2$, formule qui se réduit à $oi = 1$ en faisant $\frac{O}{F} = o$ et $\frac{I}{F} = i$, c'est-à-dire en prenant le foyer pour unité de longueur.

Cette démonstration s'appliquant à tout autre rayon très voisin de l'axe, on voit que tous les rayons qui remplissent cette condition doivent, d'après les lois de la réflexion, venir se croiser en I, ce qui rend compte de la formation de l'image.

1452. Lorsqu'au lieu d'un point lumineux on prend un objet d'une certaine dimension, comme une bougie allumée, on a une image complète dont la marche est nécessairement assujettie à la formule précédente, puisque ce que nous avons dit d'un point s'applique à tous; mais on remarque en outre que cette image est renversée et que sa grandeur varie avec sa position. Pour se rendre compte de ces deux circonstances, on n'a qu'à construire l'image totale d'après les règles que nous avons données pour un point : soient A et B les points extrêmes de l'objet (points que nous supposons à peu près à la même distance du centre de courbure C); le point A aura son image sur l'axe AC, en *a* par exemple, et le point B en *b* sur l'axe BC. Pour une autre distance de l'objet on aura de même une image renversée, mais de grandeur différente; on peut vérifier par expérience que la grandeur de l'image est représentée précisément par le nombre *i* qui donne la distance au foyer (1449), en sorte que si cette distance est 8, 3, 1/2, c'est que l'image est 8 fois, 3 fois, 1/2 fois aussi grande que l'objet. Image d'un objet. Sa distance. Son renversement. Fig. 352. Sa grandeur.

Pour établir cette règle par le raisonnement, observons qu'on a :

$$\frac{ab}{AB} = \frac{aC}{AC} = \frac{FC - Fa}{FA - FC} = \frac{1 - i}{o - i} = \frac{oi - i}{o - 1} = i$$

de sorte que si on prend pour unité la grandeur AB de l'objet, on aura $ab = i$, c'est-à-dire que la grandeur de l'image et sa distance au foyer seront exprimées par le même nombre.

Si on comptait les distances à partir du miroir, on trouverait cette loi encore très simple que *la grandeur de l'image est à la grandeur de l'objet, comme la distance de l'image est à la distance de l'objet.*

Grandeur de l'image d'un objet très éloigné.

Fig. 372.

1453. Quand il s'agit d'un objet très éloigné, on peut, sans connaître ni sa grandeur ni sa distance, calculer la grandeur de son image. D'abord, puisque l'objet est très loin, l'image est sensiblement au foyer, c'est-à-dire que $aC = MF$. Mais du centre de courbure, l'image et l'objet soutendent toujours le même angle ; on a donc :

$$\frac{ab}{aC} = tg\,ACB \text{ d'où } ab = F\,tg\,ACB$$

Elle est proportionnelle à la longueur focale.

c'est-à-dire que pour avoir la grandeur de l'image, il n'y a qu'à multiplier le foyer par la tangente de l'angle soutendu par l'objet. S'il s'agit, par exemple, de l'image du soleil donnée par un miroir de 40 pieds anglais de foyer, on a, en prenant ab pour le demi-diamètre de l'image, $ab = 40^p + tg\,16' = 2$ pouces 1/4 à très peu près ; l'image entière est donc de 4 p. 1/2, ce qui fait plus de 11 centimètres.

La grandeur et la forme du miroir sont sans influence sur la grandeur et la forme de l'image.

1454. On voit que la grandeur du miroir n'a pas d'influence sur la grandeur de l'image ; il est évident aussi par la manière dont l'image se produit, que sa forme ne dépend point de celle du miroir ; c'est d'ailleurs ce qu'on peut aisément vérifier en couvrant une partie quelconque du miroir avec un morceau de papier taillé comme on voudra ; l'image du soleil restera toujours circulaire et tout aussi grande ; il en serait de même de tout autre objet.

L'éclat et la

1455. On reconnaît dans cette expérience que l'image

perd uniformément de son éclat à mesure qu'on rétrécit la surface réfléchissante, ce qui n'a rien d'étonnant, puisque tous les points de cette surface concourent à la formation d'un point quelconque de l'image. Quand le miroir est très grand, l'image peut être assez vive pour qu'on la confonde avec un objet réel, d'autant mieux que le champ pour lequel l'image est visible est alors un cône plus largement ouvert. Ainsi lorsqu'on s'avance avec une épée vers un grand miroir concave, on croit voir en sortir une seconde épée dirigée contre la première. Voici encore une expérience curieuse : derrière un support S on tend un papier noir sur lequel on fixe une fleur renversée O, puis un peu plus loin on dispose un miroir concave M de manière à envoyer l'image I de la fleur au milieu d'un bouquet de feuilles placé dans un vase sur la table ; si la fleur est bien éclairée, on peut produire ainsi une illusion complète pour un œil placé à une certaine distance.

vraisemblance de l'image dépendent de la grandeur du miroir.

Bouquet magique.

Fig. 373.

1456. En plaçant un miroir concave derrière le trou d'une chambre noire, on obtient une peinture très vive des objets extérieurs ; c'est une miniature renversée, de même largeur à peu près que le miroir et qu'on reçoit très bien sur un carton percé appliqué à la paroi même de la chambre. Pour concevoir la formation de cette image, soit A B l'objet, M le miroir, C son centre de courbure ; les rayons émanés de A et qui peuvent passer par le trou sont réfléchis de manière à se croiser en *a* sur l'axe A C où il se fait ainsi une image du point A ; on a de même en *b* une image du point B.

Chambre noire avec un miroir concave.

Fig. 374.

1456. Quoique, d'après l'étymologie, le mot *télescope* puisse s'appliquer à tous les instruments qui servent à voir de loin, cependant on l'emploie surtout pour désigner les instruments où cet effet est produit par la réflexion de la lumière C'est un miroir concave qui forme la partie essentielle des télescopes. Dans celui de *Lemaire*, qui est le plus simple, le miroir ne se tourne pas directement vers l'objet; l'image alors vient se former un peu de côté, de sorte que la tête de l'observateur n'arrête pas les rayons incidents; le miroir est au fond d'un tube qui exclut la lumière étrangère. Pour voir l'image, il est clair qu'il faut tourner le dos à l'objet; mais ce n'est pas à l'œil nu, c'est avec une loupe

Télescope de réflexion.

Télescope de Lemaire.

qu'on vient la considérer, et suivant sa perfection elle supporte des grossissements plus ou moins considérables. Le plus grand télescope de ce genre a été construit en 1789 par Herschell père, qui en a obtenu des grossissements de 6400 fois; le miroir avait 4 pieds anglais de diamètre et 40 pieds de foyer (1453). Cet instrument gigantesque est maintenant hors d'usage; il a été remplacé en 1822 par un télescope du même genre dont le miroir a 20 pieds de foyer et 18 pouces de diamètre.

Télescope de Newton. 1457. Le télescope de Newton diffère du précédent en ce que l'image est projetée dans une ouverture latérale du tube à l'aide d'un petit miroir plan incliné de 45°, et placé dans l'axe entre le miroir et son foyer. Il en résulte qu'on est obligé de regarder, non pas suivant l'axe de l'instrument, mais perpendiculairement à cet axe. Ce télescope est peu employé.

Télescope grégorien. Fig. 375. 1458. La disposition la plus usitée dans les télescopes de moyenne et de petite dimension a été imaginée par Grégory et exécutée pour la première fois par Newton. Le grand miroir M M donne une image a qui est comme un objet devant le petit miroir m, lequel produit une image secondaire a', qu'on regarde à la loupe à travers une ouverture pratiquée au grand miroir. La première image étant renversée, la seconde se trouve redressée, de sorte qu'avec cet instrument on voit les objets droits. Le petit miroir se meut avec une vis de rappel V, afin de porter l'image secondaire au point convenable.

Amplification due au petit miroir. 1459. Il est aisé de voir que l'amplification due au petit miroir a pour mesure $\frac{F}{f}$, F et f étant les foyers respectifs. En effet, la première image étant comme un objet, le petit miroir la grossit i fois (1452); mais i est le rapport entre la distance de l'image au foyer et la longueur focale (1451). Dans le télescope grégorien, la distance de l'image secondaire au foyer du petit miroir est sensiblement égale au foyer du grand; on a donc $i = \frac{F}{f}$. D'après cela, s'il s'agit, par exemple, du demi-diamètre du soleil, la grandeur absolue de l'image secondaire sera $\frac{F^2}{f}\, tg\ 16'$ (1453). Quant au

grossissement apparent et définitif, il dépend de la loupe dont on fait usage; nous verrons plus loin comment on le mesure.

1460. Dans le télescope de *Cassegrain*, le petit miroir concave est remplacé par un petit miroir convexe placé entre le grand miroir et son foyer, ce qui permet de raccourcir le tube, mais l'image est renversée. Cet instrument n'est plus en usage. Télescope de Cassegrain.

1461. Les télescopes d'un grand pouvoir amplifiant ont très peu de champ, c'est-à-dire qu'ils ne font voir à la fois qu'une très petite portion du ciel. Comme d'après cela il est difficile de les diriger vers un point déterminé, on leur ajoute ordinairement une petite lunette qu'on appelle un *chercheur*, et avec laquelle on trouve aisément le point cherché. Les deux instruments sont liés entre eux de telle sorte que, quand un objet est dans l'axe du chercheur, il est aussi dans l'axe du télescope. Chercheur.

1462. Quand un point lumineux A est placé entre la surface et le foyer F d'un miroir concave, la réflexion ne peut plus faire converger les rayons, seulement elle les rend moins divergents, de sorte qu'ils *paraissent* provenir d'un point *a* situé à une certaine distance derrière le miroir. La distance de l'image est encore liée à celle de l'objet par la formule $oi = 1$ (1449), les distances étant alors comptées de l'autre côté du foyer. Nous laissons à faire la démonstration de cette formule pour ce nouveau cas. Images virtuelles dans les miroirs concaves. Image d'un point. Fig. 376.

1463. La même formule continue aussi à donner la grandeur de l'image (1452), mais celle-ci est droite. Il est bien évident, en effet, par la raison de symétrie, que l'image du point B doit être sur l'axe CB. Image d'un objet. Fig. 376.

1464. Comme l'image s'agrandit à mesure qu'elle s'éloigne, elle paraît toujours beaucoup plus près que ne l'indique la formule; on peut remarquer aussi qu'elle se déforme en grandissant. Un fait curieux, c'est qu'on voit encore une image virtuelle, même quand l'objet est au-delà du foyer; il est clair que dans ce cas la vision se fait par les rayons convergents qui tendent à aller former une image réelle derrière la tête de l'observateur. Remarques.

1465. Il est évident que les rayons parallèles SM, S'M', qui tombent sur un miroir convexe NN', doivent être ren- Miroir convexe. Foyer. Fig. 377.

dus divergents par la réflexion. De plus on démontre par l'expérience et par le raisonnement que les rayons réfléchis semblent tous provenir d'un même point F situé derrière le miroir, sur l'axe CX parallèle au faisceau incident et à une distance F m, qui est la moitié du rayon de courbure C m. Ce point F s'appelle le foyer du miroir ; c'est, comme on voit, un foyer *virtuel*. On appelle aussi foyer la distance F m. Voici comment on détermine cette distance pour un miroir dont on ne connaît pas le rayon de courbure. On couvre la surface réfléchissante d'un papier percé de deux trous, en M et M' par exemple ; de cette manière, en exposant le miroir au soleil, on n'a plus que les rayons incidents SM, S'M' ; on marque sur un cadre deux points dont la distance soit double de MM', puis on place ce cadre de manière que les rayons réfléchis tombent sur les points marqués N N'. Dans cette position, la distance m X du cadre est égale à la longueur focale F m ; car dans les triangles FMM', FNN', les hauteurs étant comme les bases, on a $Fm = \frac{Fm + mX}{2}$, d'où

$Fm = mX$.

Images dans le miroir convexe. Fig. 378. 1466. Les rayons émanés d'un point A placé devant un miroir convexe divergent après la réflexion, comme s'ils provenaient d'un point a placé sur l'axe AC entre le miroir et le foyer, à une distance de celui-ci donnée encore par la formule $oi = 1$ (1449), dont nous laissons la démonstration à faire pour le cas actuel. Le point B a de même son image en b sur l'axe BC, d'où l'on voit que l'image totale est toujours plus petite que l'objet ; sa grandeur relativement à l'objet est donnée par la valeur de i (1452).

Miroirs cylindriques. 1467. Les miroirs cylindriques ont à la fois les propriétés des miroirs plans et des miroirs sphériques. Ainsi, dans un miroir cylindrique convexe dont l'axe est vertical, les dimensions verticales se voient sans altération comme dans un miroir plan, mais les dimensions transversales sont fortement rétrécies. Si, au contraire, l'axe est horizontal, l'image sera de largeur naturelle, mais très écrasée. On conçoit d'après cela qu'une certaine figure MN, difforme par excès de largeur, puisse être vue avec des dimensions régulières dans un miroir cylindrique vertical AB. On fait aussi de ces anamorphoses pour des miroirs coniques, pyrami-

Anamorphoses. Fig. 379.

daux, etc.; les règles pour leur construction se déduisent géométriquement des lois de la réflexion.

Miroirs paraboliques. Fig. 380.

1468. Nous avons vu que si on plaçait un point lumineux au foyer d'un miroir concave *sphérique*, on n'obtenait le parallélisme que pour les rayons voisins de l'axe; mais avec un miroir parabolique, on peut rendre parallèles la majeure partie des rayons émanés du point lumineux. Ces miroirs seraient donc très avantageux dans les phares; mais malheureusement on ne les peut faire qu'en métal, de sorte que leur poli n'a pas de durée. Pour donner une idée de leur puissance, nous citerons les résultats d'expériences faites en 1814 par MM. Arago, de Rossel et Charles sur deux miroirs en cuivre argenté sortis des ateliers de Lenoir. Ils avaient $0^m,81$ d'ouverture et $0^m,325$ de profondeur; au foyer de l'un était un bec d'Argand de $13^{mm},5$ seulement de diamètre, brûlant 49 grammes d'huile par heure. On avait établi ce miroir sur Montmartre; vu de Montlhéri, à 7 lieues, la lumière était au moins aussi brillante que celle d'une étoile de première grandeur. L'autre miroir avait un bec d'un diamètre double, et brûlait deux fois autant d'huile; cependant, à la même distance, sa lumière était plus faible. Pour avoir le même éclat, il fallait cacher avec un écran le tiers de la surface du miroir à petite mèche. Cela montre combien il est important de concentrer la lumière au foyer. MM. Biot et Arago ont reconnu qu'avec une lunette, les feux de ces miroirs étaient visibles à 40 lieues.

CHAPITRE III.

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

§ I. *Phénomène et lois de la réfraction.*

Phénomène de la réfraction. Fig. 381.

1469. Lorsqu'on fait tomber obliquement un rayon de soleil IM sur de l'eau contenue dans une cuve à parois transparentes, on voit que le rayon MR dans le liquide forme une ligne brisée avec le rayon incident. On appelle

Condition du phénomène. *réfraction* ce changement de direction. On observe une réfraction toutes les fois que la lumière passe obliquement d'un milieu dans un autre où la vitesse est différente ; par exemple, de l'air dans le verre, du verre dans le vide, etc.

Angles d'incidence de réfraction, de déviation. Fig. 381. 1470. On appelle *angle d'incidence* l'angle i compris entre le rayon incident IM et la normale MN au point d'incidence; *angle de réfraction*, l'angle r formé par le prolongement MN′ de la normale et par le rayon réfracté MR; angle de déviation, l'angle d entre le prolongement MD du rayon incident et le rayon réfracté MR. On voit que l'angle de déviation est la différence entre les angles d'incidence et de réfraction; c'est-à-dire qu'on a $d = i - r$.

Sens de la réfraction. 1471. Le sens de la réfraction dépend de la vitesse de la lumière dans chaque milieu; si le second milieu est de nature à propager la lumière moins vite que le premier, le rayon se rapproche de la normale en se réfractant; il s'en éloigne dans le cas contraire. Nous verrons plus loin comment on mesure la vitesse de la lumière dans les différents milieux. En attendant, nous dirons qu'en général elle marche plus lentement dans les milieux plus denses, de sorte que d'après la densité on peut, dans le plus grand nombre de cas, juger du sens de la réfraction. On prévoit ainsi qu'en passant de l'eau dans l'air un rayon doit s'écarter de la normale, et c'est ce qu'on vérifie aisément en disposant un miroir sur la route du rayon réfracté dans le liquide, de manière à le renvoyer dans l'air.

La marche inverse de la lumière est la même. 1472. On remarque, en inclinant plus ou moins le miroir, que quand le rayon réfléchi se confond avec le rayon réfracté, le rayon *émergent* se confond aussi avec le rayon incident. Ce fait est d'ailleurs général, et on peut toujours affirmer que si la lumière réfractée rebroussait chemin, elle reprendrait exactement la même route dans tous les milieux précédemment traversés.

Pas de déviation angulaire à travers une lame à faces parallèles. 1473. Une conséquence importante, c'est que les déviations dues à la réfraction se compensent quand la lumière traverse un milieu à faces parallèles, car alors le rayon se trouve par rapport à la face de sortie dans les mêmes conditions que par rapport à la face d'entrée s'il rebroussait chemin. Le rayon émergent est donc parallèle au rayon incident, seulement il n'est plus sur la même ligne ; il résulte de

là un excellent moyen de reconnaître si une lame est à faces parallèles : on la fait passer devant un télescope braqué sur un objet très éloigné ; elle ne doit produire aucun déplacement de quelque manière qu'on l'incline. Dans la plus grande inclinaison possible, les rayons marchent comme si l'objet était déplacé d'une quantité égale à l'épaisseur de la lame, ce qui est insensible à cause du grand éloignement.

Grandeur de la réfraction.

1474. L'expérience prouve que la réfraction devient plus forte à mesure que le rayon incident devient plus oblique ; pour une même incidence, elle croît avec la différence de vitesse de la lumière dans les deux milieux : ainsi la réfraction est plus forte de l'air dans l'eau que de l'eau dans le verre.

Angle limite.

1475. On appelle *angle limite*, l'angle de réfraction correspondant au plus grand angle d'incidence possible, c'est-à-dire à un angle d'incidence tout près de 90°. Il est de 48° 28′ dans l'eau et de 41° 8′ dans le verre (1504). C'est un angle important à considérer, parce qu'il détermine le commencement de la réflexion totale (1422). Si, par exemple, dans l'expérience du n° 1471, on incline le miroir de manière que le rayon réfléchi forme avec la normale dans l'eau un angle plus grand que l'angle limite, la lumière ne sort plus du liquide ; on constate ainsi que les directions suivant lesquelles la lumière ne peut pas pénétrer, sont aussi des directions suivant lesquelles elle ne peut pas sortir, ce qui est parfaitement d'accord avec la loi sur la marche inverse de la lumière (1472).

Applications.

1476. Avec les simples notions que nous venons de donner sur la réfraction, on peut déjà se rendre compte d'un grand nombre d'expériences et de phénomènes naturels qui dépendent de cette modification de la lumière.

Relèvement apparent des objets placés dans l'eau. Fig. 382.

Supposons qu'on ait mis une pièce de monnaie M au fond d'un vase, et qu'on ait marqué une position O de l'œil d'où l'on commence à ne plus la voir à cause de l'opacité des parois ; il suffira de remplir le vase d'eau pour rendre la pièce visible ; celle-ci en même temps paraîtra relevée. Cela résulte évidemment de ce que les rayons sont réfractés de manière à s'écarter de la normale, alors ils doivent nécessairement paraître provenir d'un point plus élevé ; quand on regarde presque perpendiculairement, l'élévation est d'environ le quart

de la hauteur de l'eau; mais quand on regarde très obliquement, la pièce paraît presque à la surface. C'est ce qui aurait lieu si l'angle d'incidence intérieure MNP approchait de l'angle limite, s'il était, par exemple, à peu près de 48°, car alors le rayon émergent NO serait presque horizontal.

Par la considération de l'angle limite on prévoit qu'il suf-
Fig. 383. firait de couvrir une portion AB de la surface de l'eau pour que l'objet M devînt invisible, quelque largeur qu'eût ensuite le vase. A cause de l'eau qui le couvre, le fond d'un vase, d'un bassin, d'une rivière, ne nous paraît jamais aussi bas qu'il l'est réellement. Quand on descend dans un bain, on est souvent surpris de le trouver plus profond qu'on ne s'y attendait, et pour ramasser quelque chose sous l'eau il faut enfoncer le bras plus avant qu'on ne croyait devoir le faire. On doit avoir égard, comme nous l'avons dit (448), au relèvement apparent des objets placés sous l'eau, quand on veut les atteindre d'un coup de fusil.

Fig. 384. Ce relèvement explique très bien comment un bâton placé obliquement paraît rompu et raccourci; l'extrémité plongée A semble relevée, par exemple, d'un quart de sa distance à la surface; il en est de même d'un autre point quelconque B; on doit donc avoir une image rectiligne raccourcie *ab* faisant un angle avec la partie non plongée. Ainsi que dans le cas précédent, le relèvement de chaque point dépend de l'obliquité sous laquelle on regarde, et comme cette obliquité varie d'un point à l'autre, à la rigueur l'image est courbe, elle est concave vers la surface. C'est ce qu'on peut remarquer pour les tuyaux un peu longs placés sous l'eau; de même le fond d'un bassin plat semble concave.

Changement apparent de dimension. Fig. 385.

1477. On sait que les objets paraissent grossis quand ils sont dans un bocal contenant de l'eau : c'est encore un effet de la réfraction. Considérons un faisceau de rayons partis d'une extrémité A de l'objet; puisque chaque rayon en se réfractant s'écarte de la normale qui est ici le rayon de courbure, ce faisceau affectera l'œil comme s'il provenait d'un certain point *a* écarté de A, de sorte que l'objet devra paraître allongé; il paraîtrait raccourci si la surface était concave. Il y a une légère amplification à travers les surfaces planes; ainsi, un poisson paraît plus gros dans l'eau que

quand on l'en a tiré; il en est de même des pierres qu'on voit au fond d'un bassin.

1478. Quand un rayon AB se présente obliquement pour traverser l'atmosphère, il se réfracte en pénétrant dans la première couche, et même en passant d'une couche à l'autre, puisque la densité n'est pas la même. Toutes ces réfractions se font évidemment dans le même sens, de sorte que le rayon doit se propager suivant une ligne courbe dont la concavité est tournée vers la terre. L'œil qui reçoit ce rayon voit l'astre qui le lui envoie sur la direction de la partie qui le frappe, c'est-à-dire sur la tangente OA' à la dernière partie de la courbe. Ainsi les astres doivent paraître plus élevés qu'ils ne sont réellement; mais la différence est en générale fort petite; pour qu'on s'en fasse une idée, nous donnerons quelques résultats tirés des Tables de réfraction qu'emploient les astronomes :

Réfraction atmosphérique. Fig. 386.

Elle relève les astres.

Table des réfractions astronomiques.

Hauteur apparente.	Quantité à retrancher.	Hauteur apparente.	Quantité à retrancher.
70°	20″	30°	1′ 38″
60	32	20	2 35
50	47	10	5 13
40	1′ 7	0	32 54

Ces résultats se rapportent à un état moyen de l'atmosphère; ils changent un peu suivant les indications du baromètre et du thermomètre; les variations hygrométriques n'ont pas d'influence sensible, du moins pour les hauteurs supérieures à 10°. Près de l'horizon, les réfractions sont très variables.

1479. Pour concevoir comment on peut mesurer la réfraction atmosphérique, on n'a qu'à se supposer à l'équateur; alors si on observe une étoile au zénith à un instant donné, sachant qu'elle fait sa révolution en 24 heures sidérales, on a facilement sa hauteur véritable quand elle paraît à 70°, à 60°, etc.; la différence donne l'effet dû à la réfraction. Le problème est un peu plus compliqué pour une autre latitude.

Moyen de les mesurer.

1480. On voit par la table, qu'une étoile qui paraît à

La réfrac-

tion rend les astres plus long-temps visibles.

l'horizon est réellement à plus d'un demi-degré au-dessous, de sorte que par l'effet de la réfraction les astres se lèvent plus tôt et se couchent plus tard. Dans les hautes latitudes, la densité de l'air et la marche presque horizontale des astres concourent à rendre l'effet plus marqué. Képler rapporte que les Hollandais, à la Nouvelle-Zemble, ont vu le soleil paraître à l'horizon quand il était encore presque à 5° au-dessous; l'époque de son lever a été ainsi avancée de 17 jours. La réfraction avance aussi l'instant du crépuscule.

Elle les rapproche et les déforme.

1481. Si on considère deux étoiles placées l'une au-dessus de l'autre, celle qui est plus bas sera évidemment plus relevée, et le rapprochement qui en résulte sera surtout marqué lorsqu'une des étoiles sera voisine de l'horizon. L'aplatissement si connu du soleil, soit à son lever soit à son coucher, est évidemment dû à la même cause; le diamètre vertical paraît alors d'un cinquième environ plus petit que le diamètre horizontal sur lequel la réfraction n'a pas d'influence.

Effets de la réfraction dans les éclipses de lune.

1482. On sait que le disque de la lune reste encore visible pendant les éclipses; cela tient à ce que les rayons du soleil réfractés par l'atmosphère pénètrent dans l'ombre que la terre porte derrière elle. Les diamètres de la lune et du soleil ayant moins de 33′, ce qui est à peu près la mesure de la réfraction horizontale, ils peuvent paraître tous les deux en entier au-dessus de l'horizon pendant une éclipse, de sorte qu'on croirait que leurs centres ne sont pas alors en ligne droite avec le centre de la terre, et que celle-ci, par conséquent, ne doit pas couvrir la lune de son ombre. Ce phénomène a beaucoup embarrassé les anciens philosophes.

Réfractions terrestres.

1483. Les rayons provenant des objets situés à la surface de la terre éprouvent aussi quelquefois des réfractions remarquables. Les objets qu'on voit à travers l'air qui touche les surfaces échauffées, la surface d'un poêle par exemple, paraissent dans une ondulation continuelle. Si on dirige invariablement une lunette pourvue de fils croisés vers un objet qui ne soit pas de niveau avec le lieu de l'observation, cet objet paraîtra changer de position aux différentes heures de la journée, suivant la manière dont le soleil échauffera l'air intermédiaire. Des côtes de Gênes on voit les montagnes de Corse s'élever au-dessus de la mer à certaines

heures du jour, à d'autres heures elles y paraissent plongées. Du haut d'un vaisseau, l'horizon paraît abaissé ou relevé, suivant que la mer est plus chaude ou plus froide que l'air. Dans le premier cas, le rayon qui traverse obliquement des couches de densité croissante se réfracte de manière à présenter une convexité en bas : la direction OM' est alors au-dessous de la véritable direction OM; c'est le contraire dans le second cas. Sur terre, dans les opérations géodésiques, on tient compte des réfractions quand on veut mesurer la différence de hauteur de deux signaux. Fig. 387.

1483. Suivant les variations de densité des couches d'air interposées, on conçoit que les rayons partis d'un même point puissent parvenir à l'œil dans des directions qui n'aboutissent plus au même point. Mais il pourrait se faire que l'œil reçût à la fois le rayon rectiligne MO et le rayon curviligne MM'O; on verrait alors l'objet et son image; on conçoit même ainsi la multiplicité des images. Objet multiplié par la réfraction. Fig. 387.

1484. Soit AB la surface de séparation de deux couches d'air de densité différente. Si un rayon CM, contenu dans la couche la plus dense tombe très obliquement sur AB, il se réfléchira en totalité (1422), de sorte que la surface sera pour lui comme un miroir métallique; mais, à cause du peu de différence dans la densité, il faut pour cette réflexion totale que le rayon incident soit *presque parallèle* à la surface. Il semble d'après cela qu'il est à peu près impossible de rien voir dans un pareil miroir. Mais la chose devient possible si le rayon CM, quoique parti d'un objet fort relevé au-dessus de la surface réfléchissante, éprouve par des réfractions préalables une courbure qui le fasse tomber sous un angle très petit. Ce cas se réalise journellement dans les plaines de l'Égypte quand le sable est échauffé par les rayons du soleil; car alors l'air qui touche le sol est fortement dilaté, et la densité va ensuite en croissant jusqu'à une certaine hauteur. On a donc une image renversée des arbres, des villages et du ciel, à peu près comme dans un lac qui ne serait point parfaitement tranquille. C'est en cela que consiste le phénomène du *mirage*, particulièrement étudié par Monge lors de l'expédition d'Égypte, et par M. Biot à Dunkerque. Mirage. Fig. 588.

1485. Il est à remarquer que l'image est assez brillante Suspension.

pour masquer le sol sur lequel elle se projette. Quelquefois, par un défaut de configuration de la surface réfléchissante qui est si mobile, l'image d'un objet est invisible pour la position de l'observateur, et si c'est l'image du ciel qu'on voit au-dessous de l'objet, celui-ci, toujours visible par les rayons directs, semble suspendu en l'air.

Mirage inverse. 1486. Sur mer, quand l'eau est plus froide que l'air, et que la densité de celui-ci décroît rapidement à mesure qu'on s'élève, on peut observer le *mirage inverse*, dans lequel l'image paraît au dessus de l'objet, ce qui résulte de ce que les rayons ont alors leur concavité tournée en bas.

Mirage multiple. Fig. 389. On a dans ce cas observé quelquefois plusieurs images, ainsi que le montre la figure 389. Comme l'image est relevée, il peut arriver qu'elle soit seule visible, l'objet étant déjà caché par la courbure de la terre. Le capitaine Scoresby, dans les mers du Nord, reconnut ainsi le vaisseau de son père à son image renversée dans l'air, quoique le véritable vaisseau fût au-dessous de l'horizon.

Mirage latéral. 1487. On conçoit que s'il y avait une variation régulière de densité dans le sens horizontal, on pourrait avoir une image latérale. Ce phénomène a été observé sur le lac de Genève dans un endroit rétréci entre deux côtes exposées l'une au midi et l'autre au nord.

Mirage artificiel. 1488. On peut reproduire artificiellement le mirage de plusieurs manières. Avec une caisse de tôle de 4 ou 5 décimètres remplie de charbon allumé, on a une surface tout près de laquelle la densité de l'air est bien moindre qu'un peu plus haut, de sorte qu'une mire à 15 ou 20^{m} sera vue double, droite par le rayon direct, et renversée par le rayon réfléchi. Le long des parois latérales de la caisse on peut observer le mirage latéral. Le mirage se voit encore sur une longue planche noircie, échauffée par le soleil ou couverte de sable chaud. On aura le mirage inverse en faisant arriver doucement du sirop ou de l'acide sulfurique concentré sous de

Fig. 390. l'eau dans un flacon qu'on abandonnera plusieurs heures à lui-même : l'acide et l'eau se combinant peu à peu, il s'établira des couches homogènes de densité décroissante ; alors une étiquette en A sera vue directement à travers une de ces couches, et en même temps par réflexion sur une couche

de moindre densité. On obtient même le mirage multiple par ce procédé.

1489. Maintenant que nous nous sommes familiarisés avec le phénomène de la réfraction, nous étudierons les lois mathématiques auxquelles ce phénomène est soumis. Ces lois sont au nombre de deux : 1° *le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan normal à la surface réfringente*; 2° *il y a un rapport constant entre le sinus des angles d'incidence et de réfraction.* Lois de la réfraction.

Ainsi, le rayon réfracté MR ne sort pas du plan déterminé par le rayon incident IM et par la normale MN′, c'est-à-dire qu'il ne se porte ni à gauche ni à droite de ce plan. Cette première loi se conçoit sans peine; quant à la seconde, observons que si on décrit un cercle dans le plan de réfraction, du point d'incidence comme centre et avec un rayon quelconque pris pour unité, AB sera le sinus d'incidence et CD le sinus de réfraction; or, la loi signifie que si CD forme, par exemple, les 3/4 de AB, on retrouvera toujours ce rapport quelle que soit l'obliquité. Quand l'angle d'incidence sera plus grand, son sinus sera plus grand aussi; mais le sinus de réfraction croissant dans le même rapport en formera encore les 3/4. On suppose ici que la lumière passe de l'air dans l'eau; si elle passait de l'air dans le verre, le sinus de réfraction serait seulement les 2/3 du sinus d'incidence; mais ce rapport resterait constant comme l'autre pour toutes les obliquités. Pour chaque couple de milieux il y a ainsi un rapport déterminé qu'on appelle le *rapport de réfraction* ou l'*indice de réfraction*. On est convenu de prendre ce rapport en divisant le sinus de l'angle d'incidence par le sinus de l'angle de réfraction, de sorte qu'il est égal à 4/3 quand la lumière passe de l'air dans l'eau, à 3/2 quand elle passe de l'air dans le verre, etc. Représentant en général ce rapport constant par n, la deuxième loi de la réfraction pourra s'écrire : Fig. 381. Fig. 391. Rapport ou indice de réfraction.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

Cette loi s'appelle *loi de Descartes*.

1490. Le procédé que nous donnerons pour mesurer le rapport de réfraction (1498) peut évidemment servir à éta- Vérification des lois de la réfraction.

blir les lois de ce phénomène ; mais on peut déjà les vérifier par une expérience très simple. On construit sur une planche la fig. 391 en prenant pour CD les 3/4 de AB, de plus on mène un diamètre PQ perpendiculaire à NN' ; on plante des épingles aux points D, M, A ; alors si on plonge la planche verticalement dans l'eau jusqu'au diamètre PQ, on reconnaît que les trois épingles paraissent en ligne droite, d'où l'on conclut que le rayon qui vient de D en M marche ensuite suivant M A, et que, réciproquement, le rayon M A marcherait suivant M D (1472). Il est donc certain que pour l'angle IMN, le sinus d'incidence est au sinus de réfraction :: 4 : 3 ; mais on aurait le même rapport pour un autre angle ; ainsi la deuxième loi est vérifiée. Quant à la première, il suffit d'observer que si le rayon qui sort du liquide s'écartait du plan vertical qui passe par L et par M, parallèlement à la planche, les trois têtes d'épingles que nous supposons également saillantes, ne paraîtraient pas en ligne droite. Les deux rayons sont donc dans un même plan perpendiculaire à la surface où se fait la réfraction.

Fig. 391.

Marche de la lumière dans un prisme.

1491. Nous pouvons actuellement, à l'aide des lois de la réfraction, suivre la marche de la lumière à travers l'angle d'un prisme. Nous considérerons cette marche seulement dans la *section principale*, c'est-à dire dans un plan perpendiculaire à l'arête de l'angle. Soit IM un rayon incident compris dans la section principale. Pour avoir le rayon réfracté il faut faire la construction de la figure 391 en prenant pour sinus de l'angle de réfraction r, les 2/3 du sinus de l'angle d'incidence i ; nous supposons ici que le prisme est de verre. Pour avoir ensuite le rayon émergent, il suffit de répéter cette construction en prenant pour sinus de l'angle d'émergence, i' 3/2 fois le sinus d'incidence intérieure r'.

Fig. 392.

Valeur de la déviation définitive.

1492. On voit que le rayon éprouve deux déviations, d et d', l'une à son entrée et l'autre à sa sortie. La déviation totale D est évidemment ici la somme des déviations partielles : cherchons l'expression générale de cette déviation. Nous observerons d'abord que dans le cas de la figure 392, l'angle a du prisme est égal à la somme $r + r'$ des angles de réfraction et d'incidence intérieure. En effet, dans le triangle formé par la normale et le rayon dans le prisme, si

Fig. 392.

on désigne par b l'angle des normales, on a $r + r' = 180° - b$. Dans le quadrilatère formé par les normales et les faces du prisme, on a aussi $a = 180° - b$, donc $r + r' = a$.

Maintenant nous savons que $d = i - r$; que $d' = i' - r'$, par conséquent $d + d' = i + i' - (r + r')$ ou $D = i + i' - a$, c'est-à dire que la déviation totale est égale à la somme des angles d'incidence et d'émergence, moins l'angle du prisme.

Nous venons de considérer le cas où la déviation définitive est la somme des déviations partielles; c'est le cas le plus important. Il est cependant bon de savoir que, suivant l'incidence et l'angle du prisme, la déviation définitive pourrait n'être que la différence des déviations partielles, ce qui donne deux nouveaux cas où l'on a $a = r - r'$, et $a = r' - r$, d'où Remarque.

$$D = i - i' - a \text{ et } D = i' - i - a.$$

Dans les trois cas, du reste, l'effet définitif de la déviation est toujours de plier le rayon vers la base du prisme.

1493. Imaginons que sur le trajet d'un rayon horizontal SAB donné par un héliostat dans une chambre obscure, on place un prisme vertical de manière que le rayon arrive presque parallèlement à la surface; le rayon émergent ira frapper le mur en C très loin du point B. Si on tourne le prisme pour rendre l'incidence de moins en moins oblique, la tache lumineuse se rapprochera peu à peu du point B, jusqu'à venir en D, par exemple; mais ensuite elle s'en éloignera en revenant vers C, quoique l'on continue à tourner le prisme dans le même sens. Il y a donc une position pour laquelle la déviation BAD est la plus petite possible. Supposons qu'on ait mis le prisme dans cette position; en rendant les rayons incident et émergent visibles avec un peu de poussière, on reconnaîtra qu'ils sont *également inclinés sur les deux faces*, d'où l'on peut conclure qu'il en est de même du rayon intérieur qu'on verra d'ailleurs aussi, pourvu que le prisme ait un certain volume et que sa base supérieure soit polie. Ajoutons que le calcul démontre rigoureusement cette marche symétrique du rayon dans le cas de la déviation minima. Ainsi, dans ce cas on a: Déviation minima. Fig. 393.

$$r' = r = \frac{a}{2},\ i' = i, \text{ d'où } D = 2i - a$$

Position newtonienne. La position qui donne le minimum de déviation ayant été d'abord signalée par *Newton*, qui en a tiré grand parti comme nous le verrons, s'appelle souvent *position newtonienne*. Nous remarquerons qu'aux environs de cette position, la déviation ne change pas sensiblement quoiqu'on incline un peu le prisme.

Cas où la déviation est proportionnelle à l'angle du prisme. 1494. Quand l'angle du prisme et l'angle d'incidence sont petits, on a une valeur approchée de la déviation qui est d'un emploi très fréquent en optique. D'abord il est facile de voir par les formules du n° 1492, que si les angles a et i sont petits, tous les autres le sont aussi. Or, pour les petits angles, les sinus se confondent avec les arcs; alors la loi de Descartes (1488) se réduit à $i = nr$; on a de même $i' = nr'$, et par conséquent dans les trois cas cités (1492), $D = a(n-1)$, c'est-à-dire que la déviation totale est égale à l'angle du prisme multiplié par l'indice de réfraction diminuée de l'unité. Par exemple, pour le verre, où $n = 3/2$, la déviation est précisément la moitié de l'angle du prisme, et cela est vrai quelle que soit la partie du prisme où le rayon tombe et quel que soit l'angle d'incidence pourvu qu'il soit petit. Avec un prisme d'eau où $n = 4/3$, la déviation est le tiers de l'angle du prisme; il est cependant bon de savoir que la déviation approchée est plus petite que la déviation vraie.

Prisme à angle variable. Fig. 394. 1495. Dans les cours d'optique, pour démontrer par expérience l'influence de l'angle sur la déviation, on se sert du *prisme à angle variable* qui est une espèce de boîte remplie d'eau dont les parois A A' B B' sont en glace et peuvent s'incliner à volonté sans laisser échapper le liquide; des arcs divisés mesurent les inclinaisons. Mettant l'instrument sur le trajet du rayon, on s'assure d'abord qu'il n'y a pas de déviation quand les faces du prisme sont parallèles; si ensuite on les incline de manière à avoir un angle de 3°, en supposant qu'il y ait de l'eau, la déviation sera de 1°; elle sera ensuite de 2, de 3° quand on doublera ou quand on triplera l'angle du prisme. Comme il ne s'agit ici que de petits angles, les déplacements de l'image lumineuse sur la muraille pourront servir de mesure. On remarquera que la déviation ne change pas sensiblement lorsqu'on incline lé-

gèrement le prisme en totalité, ce qui cependant change l'angle d'incidence.

1496. La formule $D = a(n-1)$, montre que la déviation pour de petits angles augmente avec l'indice n de réfraction; mais le calcul fait voir que cela est vrai pour des angles quelconques, ce qui fournit un procédé très simple pour reconnaître les substances qui réfractent le plus la lumière. S'il s'agit de liquides, on les verse dans une petite cavité prismatique en glace divisée en plusieurs compartiments, ce qui forme autant de prismes du même angle. En les présentant à un rayon solaire, on voit quelles substances le relèvent le plus. Voici l'ordre pour les liquides les plus connus: eau, éther, alcool, acides hydrochlorique, nitrique, sulfurique (concentrés); huiles d'olives, de naphte; essence de térébenthine. L'eau est ici le liquide le moins réfringent. On voit que les substances inflammables et riches en carbone sont très réfringentes; leur composition compense souvent la faiblesse de leur densité.

Usage de la déviation pour comparer les substances réfringentes.

Prisme à liquides. Fig. 395.

Pour les solides, on se sert du *polyprisme*, instrument formé d'un grand nombre de prismes de même angle collés ensemble. En commençant par les substances les moins réfringentes, on a: 1° verre ordinaire ou sans plomb; 2° verre à glaces; 3° cristal de roche; 4° cristal artificiel ou verre avec oxide de plomb. On compare ainsi les différents échantillons de crown-glass (verre sans plomb) et de flint-glass (verre avec plomb). Le verre ordinaire réfracte plus que tous les liquides précédemment cités; mais il y a des liquides plus réfringents que lui, le sulfure de carbone, par exemple.

Polyprisme.

1497. Les objets vus à travers un prisme d'un petit angle semblent déplacés sans changement notable dans leur distance ou dans leurs dimensions; il est aisé de se rendre compte de ce phénomène d'après ce que nous avons vu sur la déviation (1494). Soit AB le prisme, O un point lumineux; le rayon OA éprouve la déviation D, il paraît donc venir suivant IA; le rayon OB éprouve la même déviation, d'où il suit que le point d'intersection I est sensiblement à la même distance du prisme que le point O. En effet, dans les triangles ICA et OCB, les angles en C sont égaux ainsi que les angles en A et en B, ce qui emporte l'égalité des angles en

Déplacement des objets vus à travers un prisme. Fig. 396.

sur le même rapport, ce qui démontre pleinement la loi de Descartes.

1499. Le procédé que nous venons d'indiquer peut paraître indirect, mais il est d'une extrême précision, parce que l'angle du prisme et l'angle de déviation se mesurent avec une exactitude rigoureuse. Ce qui lui donne encore beaucoup de valeur, c'est que pour avoir la déviation minima, il n'est pas nécessaire que le prisme soit mathématiquement dans la position newtonienne (1493).

1500. Pour appliquer le procédé aux liquides, on a un prisme de verre percé d'un trou A; les deux faces de l'angle sont couvertes par des glaces; on verse le liquide dans la cavité par l'ouverture *a*, qu'on ferme ensuite avec un bouchon usé à l'émeri. Le prisme liquide ainsi formé peut se mettre dans toutes les positions. Comme les glaces n'ont généralement pas leurs deux faces parallèles et sont de véritables prismes, on mesure avant de mettre le liquide la déviation qu'elles produisent, afin d'en tenir compte.

Modifications pour les liquides. Prisme de Biot. Fig. 397.

1501. *Indice de réfraction des solides et des liquides.*

Glace	1,31	Verre commun } de	1,5
Eau	1,336	Crown glass	
Albumine de l'œuf	1,36	Verre à glace } à	1,55
Eau de-vie	1,36	Mastic en larmes	1,54
Éther sulfurique	1,36	Sel gemme	1,545
Alcool $d = 0,866$	1,37	Térébenthine	1,545
Alcool rectifié	1,372	Ambre	1,547
Acide hydrochlorique concentré	1,41	Cristal de roche réfr. ord.	1,548
Acide nitrique $d = 1,48$	1,41	— — réfr. extr.	1,558
Acide sulfurique concentré	1,44	Résine	1,55
Cire bouillante	1,44	Flint-glass ou cristal } de	1,576
Cire fondante	1,45	Verre avec plomb } à	1,642
Huile d'olives	1,47	Sulfure de carbone	1,678
Huile de naphte	1,475	Verre d'antimoine	1,98
Essence de térébenthine $d = 0,885$	1,48	Soufre	2
Huile de lin	1,485	Phosphore	2,1
Spath d'Islande réfr. extr.	1,483	Diamant $d = 3,4$	2,44
— — réfr. ord.	1,654	Chromate de plomb	2,97

1502. Cette table donne l'indice de réfraction quand la lumière passe de l'air dans la substance que l'on considère. Or, comme nous le verrons, l'indice de réfraction d'un milieu dans un autre est précisément le rapport des vitesses de la lumière dans ces deux milieux. Ainsi les nombres de la table représentent la vitesse dans l'air, celle qui a lieu dans la substance que l'on considère étant prise pour

Applications. Vitesse de la lumière dans les différents milieux.

unité, par exemple l'indice du soufre étant 2, je conclus que la vitesse de la lumière dans l'air est deux fois aussi grande que dans le soufre. La réciproque $\frac{1}{2}$ de l'indice me donnera la vitesse dans le soufre, celle dans l'air étant prise pour unité. Dans cette même supposition, $\frac{1}{1,326}$ et $\frac{1}{1,52}$ représenteront les vitesses dans l'eau et dans le verre ordinaire.

Calcul des indices relatifs.

1503. Quand on connaît les indices n et N d'un milieu par rapport aux deux autres, il est aisé de calculer l'indice des deux milieux entre eux, puisque c'est tout simplement le rapport des vitesses. Prenant donc pour unité la vitesse dans le premier milieu, les vitesses dans les deux autres seront $\frac{1}{n}$ et $\frac{1}{N}$, et le rapport $\frac{1}{n} : \frac{1}{N} = \frac{N}{n}$ sera l'indice cherché. Par exemple, l'indice de l'eau dans le verre ordinaire est $\frac{1,52}{1,336}$ ou $\frac{9}{8}$ à très peu près; c'est, comme on voit, le rapport *renversé* des indices. Pour fixer les idées, nous supposerons en général que l'indice est pris pour le cas où la lumière passe du milieu le moins réfringent dans le plus réfringent; de cette manière l'indice sera toujours un nombre supérieur à l'unité.

Calcul de l'angle limite.

1504. L'angle limite est, comme nous savons (1475) l'angle de réfraction correspondant à l'incidence de 90°; on le détermine aisément d'après la connaissance de l'indice de réfraction. En effet, dans l'équation $\sin i = n \sin r$, quand on pose $i = 90°$, r devient égal à l'angle limite l; on a donc $1 = n \sin l$, d'où $\sin l = \frac{1}{n}$. On trouve ainsi que l'angle limite est de 48° 28′ pour l'eau, et de 41° 8′ pour le verre, en admettant que les indices soient 1,336 et 1,52.

Cas dans lesquels la lumière ne peut pas traverser un prisme.

1505. Il est clair qu'un rayon ne pourra pas sortir d'un prisme quand l'incidence intérieure sera plus grande que l'angle limite (1475). Il suit de là que si l'angle du prisme est égal à l'angle limite, les rayons qui tombent sur la première face, entre la normale et le sommet, ne peuvent pas sortir; car pour eux on a $r' = l + r$ (1492). Les autres rayons ne passent pas non plus, si l'angle du prisme est

double de l'angle limite ou plus grand, puisque alors on a toujours $r' > l$. Ainsi il ne faut pas essayer de voir à travers un angle droit d'un prisme de verre ; mais la lumière peut encore traverser un angle droit formé par de l'eau ou de la glace.

1506. Soit ABC un prisme ayant une face horizontale BC dans laquelle on regarde l'image du ciel comme dans un miroir. En abaissant graduellement l'œil, on trouve une certaine position dans laquelle l'image prend tout-à-coup un éclat très vif ; évidemment c'est qu'alors le phénomène de la réflexion totale commence. Maintenant, si on applique une goutte d'eau sous la face inférieure du prisme, on la verra comme une tache obscure, parce que la réflexion ne sera plus totale vis-à-vis la goutte ; mais en abaissant l'œil davantage, on trouvera une nouvelle position O pour laquelle la réflexion redeviendra totale, ce qu'on reconnaît à ce que la goutte disparaît tout-à-coup. Par un appareil convenable, on arrive à déterminer l'angle d'incidence intérieure, qui est alors l'angle limite. On a donc $\sin. l = \frac{1}{n}$, n étant l'indice non plus de l'air dans le verre, mais de l'eau dans le verre. De même si au lieu d'eau on avait une goutte d'un autre liquide, on connaîtrait l'indice de ce liquide par rapport au verre, et on aurait par suite l'indice de l'air par rapport au liquide (1503). On a même étendu ce procédé aux corps opaques, mais il faut qu'ils soient moins réfringents que la matière du prisme. En opérant avec un prisme de flint sur une goutte de cire, Malus a suivi toutes les variations de l'indice de réfraction, qui n'est que 1,45 pour la cire fondue et transparente, tandis qu'il dépasse 1,51 pour la cire froide et opaque. Mesure des indices par l'angle limite. Fig. 398.

1507. Pour déterminer l'indice de réfraction des gaz, on se sert d'un prisme creux formé par un tube AB, dont les extrémités coupées très obliquement sont fermées par des glaces. On fait le vide dans l'appareil, puis on y fait entrer le gaz ; la tension est mesurée par un baromètre C. Pour avoir l'indice de réfraction du vide dans l'air, on laisse le tube vide ; le rayon S en pénétrant s'écarte de la normale, ce qui donne une première déviation $r - i$; il s'en rapproche à la sortie, où la déviation est $r' - i'$. Ces deux déviations Indice de réfraction des gaz. Fig. 399. Fig. 400.

concourent à plier le rayon vers le sommet du prisme, de sorte que la déviation totale est égale à leur somme. Or, le prisme étant dans la position newtonienne, on a $i = i'$, $r = r'$ $= \frac{a}{2}$, et par suite $D = a - 2i$. Le rapport cherché, qui est ici $\frac{\sin r}{\sin i}$, devient donc $\frac{\sin \frac{1}{2} a}{\sin \frac{1}{2}(a - D)}$. D est mesuré comme précédemment en prenant l'angle entre le rayon émergent et le rayon direct S'. On a trouvé ainsi, en opérant à la température de zéro, que le sinus d'incidence était au sinus de réfraction :: 3389 : 3388, quand la lumière passe du vide fait à 3 millimètres dans l'air ayant 0^m, 17664 de force élastique. On voit que dans ces expériences le prisme doit être d'un très grand angle; encore la déviation est-elle toujours fort petite; par exemple, avec un prisme de plus 143° MM. Biot et Arago n'avaient qu'une déviation d'environ 6 minutes.

Indice absolu ou principal.

1508. On appelle *indice absolu* ou *principal* le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction, quand la lumière passe du vide absolu dans le corps que l'on considère. Quand il s'agit des solides et des liquides, on peut prendre pour indice absolu l'indice relatif à l'air, mais la distinction est indispensable pour les gaz. D'après ce que nous avons dit précédemment (1502), l'indice absolu représente la vitesse de la lumière dans le vide absolu, en prenant pour unité la vitesse dans la substance à laquelle l'indice se rapporte. Soit W la vitesse dans le vide, V la vitesse dans le corps dont l'indice est n, on a $n = \frac{W}{V}$ d'où $n^2 - 1 = \frac{W^2 - V^2}{V^2}$; la quantité $n^2 - 1$ est

Puissance réfractive.

ce qu'on appelle la puissance réfractive; c'est, comme on voit, la perte qu'éprouve la lumière dans le carré de sa vitesse; le carré de la vitesse dans le corps où elle pénètre étant pris pour unité. Si on divise la puissance réfractive

Pouvoir réfringent.

d'un corps par sa densité, on a son *pouvoir réfringent* dont l'expression est ainsi $\frac{n^2 - 1}{d}$. Ces dénominations, imaginées par Newton d'après des vues théoriques abandonnées aujourd'hui, sont cependant encore très employées.

Le pouvoir

1509. Par un très grand nombre d'expériences faites

vers 0 et 25°, sous des pressions qui variaient depuis 2 jusqu'à 770 millimètres, MM. Biot et Arago ont reconnu que le pouvoir réfringent de l'air ne variait pas, c'est-à-dire qu'on avait toujours $\frac{n^2-1}{d} = \frac{N^2-1}{D}$, n et N étant les indices absolus correspondant aux densités d et D. Pour concevoir comment on a pu constater cette loi sans connaître n et N, admettons pour un instant qu'elle soit vraie. En désignant par x le pouvoir réfringent, nous avons $x = \frac{n^2-1}{d} = \frac{N^2-1}{D}$ d'où $\frac{N}{n} = \sqrt{\frac{1+xD}{1+xd}}$ (A). Le rapport $\frac{N}{n}$ n'est pas autre chose que l'indice de réfraction du vide imparfait dans l'air (1502); tout à l'heure, par exemple, c'était $\frac{3389}{3388}$; et comme les densités d et D sont connues, x se trouve déterminé par l'équation ; on a ainsi $x = 0,000589$. Avec ce nombre, et toujours dans l'hypothèse de l'invariabilité du pouvoir réfringent, on peut assigner d'avance, à l'aide de la formule (A), le nouvel indice $\frac{N}{n'}$ correspondant au cas où l'on a mis dans le prisme de l'air, ayant une densité quelconque d'; ce nouvel indice peut aussi se mesurer directement comme nous l'avons dit (1507). Or, les résultats du calcul s'accordent toujours rigoureusement avec ceux de l'expérience ; la loi se trouve donc ainsi vérifiée *à posteriori*.

Pouvoir réfringent de l'air est constant.

L'équation, qui exprime l'invariabilité du pouvoir réfringent, peut être mise sous la forme :

La puissance réfractive est proportionnelle à la densité.

$$N^2-1 : n^2-1 :: D : d$$

On voit ainsi que la puissance réfractive est proportionnelle à la densité.

Ce que nous venons de dire de l'air a été aussi vérifié pour les autres gaz.

Il en est de même des autres gaz.

1510. Sachant que le pouvoir réfringent de l'air est constant, il est aisé de déterminer l'indice absolu de ce gaz. Cela se réduit à tirer N des deux équations $\frac{n^2-1}{d} = \frac{N^2-1}{D}$ et

Indice absolu de l'air.

$\frac{N}{n} = m$, m étant l'indice du vide imparfait dans l'air, d et D les densités faciles à calculer d'après les indications du baromètre et du thermomètre (515) (941). Connaissant ainsi l'indice absolu N par la pression h et la température t, l'on désigne par N_0 cet indice à 0° sous la pression de 760 millimètres, par D_0 la densité de l'air dans la même circonstance, on aura :

$$\frac{N_0^2 - 1}{D_0} = \frac{N^2 - 1}{D} \text{ d'où } N_0^2 = 1 + \frac{760\,(267 + t)}{267\,h}(N^2 - 1).$$

On a trouvé ainsi $N_0 = 1{,}000294$, valeur qui s'accorde avec celle que Delambre a déduite des réfractions astronomiques. L'équation précédente donnera l'indice absolu N pour une température et une pression quelconque, quand on y mettra 1,000294 pour N_0.

Indices des gaz autres que l'air.

1511. M. Dulong a déterminé avec une très grande exactitude les indices absolus des gaz autres que l'air par un procédé fondé sur ce que la puissance réfractive est proportionnelle à la densité. Devant le prisme creux rempli d'air sec on établit solidement une lunette de manière qu'une mire éloignée tombe précisément sous le fil placé au foyer. On remplace ensuite l'air par le gaz, que l'on comprime ou que l'on dilate jusqu'à ce que la mire revienne sous le fil. On est sûr qu'alors l'indice de réfraction du gaz est le même que celui de l'air. Soit n cet indice, on n'aura qu'à le mettre au lieu de N dans la formule précédente, pour obtenir l'indice n_0 du gaz à zéro sous la pression 670 millimètres.

1512. *Indice de réfraction et puissance réfractive des gaz et des vapeurs à 0° sous la pression de 0m,76.*

	Indice de réfraction.	Puissance réfractive.
Hydrogène	1,000138	0,000277
Oxigène	1 000272	0,000544
Air atmosphérique	1,000294	0,000589
Azote	1,000300	0,000601
Gaz nitreux	1,000303	0,000606
Oxide de carbone	1,000340	0.000681
Ammoniaque	1,000385	0,000771
Gaz des marais	1.000443	0,000886
Acide carbonique	1,000449	0,000899
Acide chlorhydrique	1,000449	0,000899
Acide hydrocyanique	1,000451	0,000903
Protoxide d'azote	1,000503	0,001007
Hydrogène sulfuré	1,000644	0.001288
Acide sulfureux	1,000665	0,001331
Gaz oléfiant	1,000678	0,001356
Chlore	1.000772	0,001545
Hydrogène protophosphoré	1,000789	0,001579
Cyanogène	1,000834	0,001668
Éther muriatique	1,001095	0,002191
Gaz chloroxicarbonique	1,001159	0,002318
Sulfure de carbone	1,001500	0,003010
Éther sulfurique	1,001530	0,003061

Il résulte du travail de M. Dulong qu'entre 8° et 32° la température n'apporte aucun changement dans les rapports des puissances réfractives du gaz.

1513. D'après les expériences de M. Biot, l'air sec ou l'air humide occasionnent la même déviation, d'où il suit que l'indice de réfraction de la vapeur d'eau est sensiblement le même que celui de l'air dans les circonstances atmotsphériques. M. Arago a fait voir qu'il y avait une différence, mais elle est fort légère. M. Dulong a démontré que quand les vapeurs approchent de leur maximum de densité, leur puissance réfractive n'est plus proportionnelle à leur densité; elle augmente alors dans un rapport plus grand. Il a Indice des vapeurs.

établi aussi que le *pouvoir réfringent* d'une substance à l'état liquide était plus grand que le pouvoir réfringent de la même substance à l'état gazeux.

Puissance réfractive des mélanges gazeux.

1514. M. Dulong a encore reconnu par des expériences directes que la puissance réfractive d'un mélange gazeux était égale à la somme des puissances réfractives des gaz composants; ce qui confirme la loi établie par MM. Biot et Arago (1509). Il résulte de là un nouveau procédé d'analyse quantitative; car si on mesure la puissance réfractive du mélange (1511), on n'aura plus qu'un calcul très simple à faire pour déterminer les proportions. Prenons, par exemple, l'air en négligeant l'acide carbonique; la puissance réfractive de l'air étant 1, celle de l'azote est 1,02, et celle de l'oxigène 0,924. Soit 1 volume du mélange, x la proportion d'oxigène, et parconséquent $1-x$ celle de l'azote. La puissance réfractive de l'oxigène à l'état de densité où il est dans le mélange, sera $x.\ 0{,}924$. De même on aura $(1-x)$ 1,02 pour celle de l'azote. Ces deux puissances réfractives ne font que s'ajouter et doivent former la puissance réfractive du mélange, ce qui donne l'équation $x.\ 0{,}924+(1-x)\ 1{,}02=1$, d'où $x=0{,}208$. Telle est la proportion d'oxigène; on a par conséquent 0,792 pour l'azote.

La loi ne s'applique plus aux combinaisons. Ainsi on ne retrouve plus la puissance réfractive de l'ammoniaque en prenant dans la proportion convenable les puissances réfractives de l'azote et de l'hydrogène. Ceci est une nouvelle preuve que l'air est un simple mélange et non pas une combinaison.

§ II. *Des lentilles et des instruments qui en sont formés.*

Des lentilles en général.

1515. En optique, on entend généralement par *lentille* un corps transparent taillé de manière à rassembler ou à disperser les rayons par la réfraction. La forme est presque toujours celle d'un disque circulaire, dont une des faces au moins est courbe, soit concave, soit convexe; les seules courbures usitées sont les courbures sphérique et cylindrique. On donne la forme en usant le disque avec différentes poudres dans des bassins de métal concaves ou convexes tail-

lés au tour. La plupart des lentilles sont en verre ou en cristal (crown-glass ou flint-glass); on en fait aussi en cristal de roche, et de très petites pour les microscopes en grenat, en saphir, en diamant. Les *lentilles fluides* sont formées par un liquide compris entre deux glaces courbées comme des verres de montre; ce sont les verres ardents les plus puissants à cause des dimensions qu'on peut leur donner (1357). Fresnel a fait exécuter des lentilles également très puissantes avec plusieurs pièces de verre taillées convenablement. Comme les pièces ne forment pas une courbure continue, on donne à ces lentilles le nom de *lentilles à échelons*. Dans la figure, on en voit une de face et de profil. Avec une de ces lentilles de 2 pieds de diamètre, on fond le fer et le platine. Verres ardents. Fig. 401.

1516. Les lentilles *sphériques*, c'est-à-dire celles dont les faces présentent une courbure sphérique, se divisent en six genres d'après la combinaison des courbures. Classification des lentilles sphériques.

1er genre. Lentille biconvexe; les deux faces sont convexes. Fig. 402.

2e — Lentille plan-convexe; une des faces est plane, l'autre convexe.

3e — Ménisque convergent; une des faces est convexe, l'autre concave; la convexe est plus fortement courbée ou d'un rayon plus court.

4e — Lentille biconcave; les deux faces sont concaves.

5e — Lentille plan-concave; une des faces est plane; l'autre concave.

6e — Ménisque divergent; une des faces est convexe, l'autre est concave; celle-ci est plus fortement courbée ou d'un rayon plus court.

Le mot ménisque vient de ce que la coupe de la lentille ressemble à un croissant, μηνισκος.

Les trois premiers genres forment la classe des lentilles *convergentes*; exposées au soleil, elles font converger les rayons. On les reconnaît encore à ce qu'elles grossissent les objets qu'on regarde à travers, et à ce qu'elles sont plus épaisses au milieu que vers les bords. Lentilles convergentes.

Les trois derniers genres forment la classe des lentilles *divergentes*, ainsi nommées parce qu'elles font diverger les rayons solaires qui les traversent; elles font paraître les objets plus petits et sont plus épaisses au bord qu'au milieu. Lentilles divergentes.

Axe principal. 1517. On appelle *axe principal* d'une lentille, ou simplement *axe*, une droite indéfinie normale à ses deux faces.

Fig. 403. Celles-ci étant des surfaces sphériques, l'axe passe nécessairement par les centres *c* et C des sphères auxquelles les surfaces appartiennent. On dit qu'une lentille est bien *centrée* quand son axe passe aussi par les centres de ses faces; c'est nécessairement le cas des lentilles dont le bord est tranchant, et en général de celles qui, étant circulaires, ont exactement la même épaisseur sur toute leur circonférence. Une lentille AB plus épaisse d'un côté que de l'autre est évidemment mal centrée; l'axe véritable A_1A_2 ne passe pas par les centres B_1B_2 des surfaces; mais comme il n'est pas toujours facile de reconnaître la différence d'épaisseur, nous indiquerons un procédé plus délicat en parlant des lunettes.

Ce que c'est qu'une lentille bien centrée.

Fig. 404.

Centre optique. 1518. Il y a pour toute lentille un point appelé *centre optique* qui jouit de cette propriété remarquable, qu'un rayon passant par ce point n'éprouve pas de déviation angulaire.

Fig. 405. Considérons, par exemple, une lentille équi-convexe; prenons le milieu C de l'épaisseur; il est évident que toute droite passant par C rencontre les deux côtés de la lentille en des points où les éléments de surface sont parallèles; on rentre donc dans le cas d'une lame à faces parallèles (1473), et le rayon qui se présente en *m* sous une incidence convenable pour que la réfraction le fasse passer par C, doit sortir en *m'* parallèle à sa direction première. Ainsi, d'après la définition, le point C est bien le *centre optique*; on trouverait de même que ce centre est au milieu de l'épaisseur d'une lentille équi-concave. Il est encore évident que pour les lentilles qui ont une face plane, ce point est à l'intersection de l'axe avec la face courbe. Pour les autres cas il faut recourir à des considérations géométriques; nous indiquerons seulement quelques résultats. Dans les lentilles biconvexes ou biconcaves à courbure inégale, le centre optique est plus près de la face la plus courbe; sa distance aux deux faces est dans le rapport même des rayons de courbure; il en est de même pour les ménisques, mais alors le centre optique se trouve *hors* du verre. Du reste, par la raison de symétrie, on voit qu'il est toujours sur l'axe principal.

Axes obliques. 1519. On appelle *axe oblique*, toute droite indéfinie qui

passe par le centre optique sans se confondre avec l'axe principal. Comme les lentilles sont en général fort minces, on peut admettre sans erreur sensible qu'un rayon qui passe par le centre optique reste en ligne droite, et par conséquent coïncide avec un axe oblique.

1520. Lorsqu'on expose directement une lentille convergente C au soleil, les rayons sont réfractés de manière à passer par un même point F qu'on appelle *foyer* à cause de la chaleur qui s'y produit. On rend ce phénomène bien évident en opérant dans une chambre obscure et en répandant un peu de poussière sur le trajet des rayons. Si on couvre la lentille d'un papier noir percé de trous, on voit les rayons isolés converger vers le même point; si on incline la lentille, les rayons incidents ne sont plus parallèles à l'axe principal; cependant, pourvu que l'inclinaison ne soit pas trop grande les rayons réfractés se rassemblent encore en un même point F' situé sur l'axe oblique correspondant. De là la distinction du foyer principal et des foyers obliques. **Foyer.** **Fig. 406.** **Foyer principal.** **Foyers obliques.** **Fig. 407.**

On appelle *distance focale*, ou simplement *foyer*, la distance du foyer au centre de la lentille. Il est à remarquer que cette distance reste la même quelle que soit la face qu'on présente au soleil. Observons aussi que pour de petites inclinaisons la distance est la même pour le foyer principal et les foyers obliques. **Distance focale.**

Avec les lentilles divergentes, les rayons se dispersent au lieu de se rassembler; mais ils se dispersent comme s'ils provenaient d'un certain point qu'on appelle foyer *virtuel*, pour le distinguer du foyer *réel* donné par les lentilles convergentes. La distance du foyer virtuel se mesure pour les lentilles comme pour les miroirs (1465). On n'a qu'à tracer sur un carton un cercle d'un diamètre double de celui de la lentille; quand les rayons dispersés couvriront ce cercle, la distance de la lentille au carton sera précisément égale à la distance focale. **Foyer réel, foyer virtuel.** **Mesure du foyer des lentilles divergentes.**

1521. Par *ouverture* d'une lentille on entend ordinairement son diamètre; ainsi une lentille de 5 pouces d'ouverture est une lentille de 5 pouces de diamètre. Quelquefois aussi par ouverture on entend l'arc de courbure; l'ouverture alors se mesure en degrés. Il est évident par la génération même des lentilles sphériques (fig. 403), que la petitesse des sphères **Ouverture d'une lentille.** **Causes qui la limitent.**

auxquelles les courbures appartiennent entraîne forcément la petitesse de la lentille. Mais en outre, comme nous le verrons, une lentille ne peut produire de bons effets que quand son arc de courbure est seulement de quelques degrés (1526); nouvelle raison pour diminuer son ouverture. L'épaisseur qu'on peut donner aux lentilles limite encore leurs diamètres; car, lorsque les courbures sont fortes, un grand diamètre entraînerait une épaisseur telle, qu'on trouverait difficilement des morceaux de verre assez purs, et qu'il y aurait une perte considérable de lumière. Ainsi les lentilles à court foyer sont nécessairement petites. Quant aux lentilles à long foyer, elles ne sont pas nécessairement grandes; rien d'ailleurs n'empêche de tailler un disque aussi petit qu'on veut dans une grande lentille; cela ne change pas le foyer; mais leur grandeur est limitée par l'épaisseur et par la nécessité de ne donner à l'arc de courbure qu'un petit nombre de degrés.

Relation avec le foyer.

Décomposition d'une lentille en prismes.

1522. Il est évident que le bord tranchant d'une lentille peut être considéré comme l'angle d'un prisme; si on l'abat, il reste vers le nouveau bord un angle tronqué plus épais, mais réellement plus petit, car l'inclinaison des faces est moindre. En continuant ainsi, on voit qu'une lentille est un assemblage de prismes dont l'angle, qui est nul vis-à-vis de l'axe, va en augmentant par degrés insensibles à mesure qu'on s'approche du bord. La considération des lentilles à échelons (fig. 401) rend encore cette décomposition plus facile à concevoir.

Angle d'un prisme élémentaire.
Fig. 408.

1523. Il est aisé de mesurer l'angle d'un prisme élémentaire. Prenons d'abord une lentille plane d'un côté : l'angle du prisme ou l'angle des faces, en un point quelconque M, est précisément égal à l'angle que le rayon de courbure CM forme avec l'axe, car les côtés de ces angles sont respectivement perpendiculaires. Désignant donc l'angle du prisme par α, on a rigoureusement $\sin\alpha = \frac{ML}{r}$, r étant le rayon de courbure; et par une approximation permise pour les petits angles, $\alpha = \frac{ML}{r}$. Si l'autre face de la lentille est courbe, on

a de même $\alpha' = \frac{ML}{r'}$; la somme $\alpha + \alpha'$ donne l'angle à mesurer a ; donc

$$a = ML\left(\frac{r+r'}{rr'}\right)$$

S'il s'agit d'un ménisque, on a $r - r'$ au lieu de $r + r'$; mais dans tous les cas l'angle croît proportionnellement à la distance de l'axe.

1524. Supposons maintenant un rayon incident SM parallèle à l'axe, et déterminons le point F où l'axe est rencontré par le rayon réfracté. L'angle de déviation D est égal à MFL ; et comme il ne s'agit que de petits angles qui ont indifféremment pour mesure l'arc, le sinus ou la tangente, on a $D = \frac{ML}{LF}$. Remarquons en outre que la lentille étant supposée très mince, si on désigne par F la distance de son centre au point F, on a sensiblement LF = F, de sorte que la déviation devient $D = \frac{ML}{F}$. Mais (1494) nous avons aussi $D = a(n-1)$; mettant donc pour a sa valeur (1523), et égalant les deux expressions de la déviation, on tire — Détermination du foyer par le calcul. Fig. 409.

$$F = \frac{rr'}{(n-1)(r+r')}.$$

ML disparaît, ce qui nous montre que la position du point F ne dépend pas de la distance entre l'axe et le rayon incident, et que par conséquent tous les rayons parallèles à l'axe se trouvent réfractés vers un même point. Nous connaissions déjà cette propriété des lentilles, mais seulement comme un résultat d'expérience (1520).

1525. La formule donne également le foyer virtuel ; pour s'en convaincre, il suffit d'appliquer le raisonnement précédent au cas d'une lentille divergente. Pour les ménisques, d'après ce que nous avons dit (1523), il faut prendre la différence des rayons de courbure au lieu de leur somme. — Applications.

L'expérience prouve que le foyer ne change pas sensible-

ment quand on présente au soleil l'autre face de la lentille; cela s'accorde avec la formule, qui dit en effet que le foyer dépend seulement des rayons de courbure et de l'indice de réfraction.

Pour les lentilles symétriques où $r'=r$, on a $F=\frac{r}{2(n-1)}=r$, en supposant $n=\frac{3}{2}$. Dans la même supposition pour les lentilles planes où $r'=\infty$, on a $F=2r$. Si donc on a une lentille équiconvexe de $\frac{1}{2}$ de ligne de foyer, on peut affirmer que son rayon de courbure n'est guère que de $\frac{1}{2}$ de ligne; et si on veut une lentille de 100 pieds de foyer, il faut, même en la faisant plane, donner à l'autre face la courbure d'une sphère de 100 pieds de diamètre, ou plutôt de 110 pieds, car l'indice du verre dont on fait ordinairement les lentilles est $\frac{31}{20}$.

Aberration de sphéricité. Fig. 410. 1526. Observons maintenant qu'à la rigueur l'angle des faces croît plus vite que nous ne l'avons supposé, de sorte que les rayons voisins des bords viennent couper l'axe entre la lentille et le foyer des rayons centraux. C'est en cela que consiste l'*aberration de sphéricité*, qui est une conséquence nécessaire de la courbure sphérique. Le phénomène est très marqué avec une lentille de 20 ou 30° d'ouverture; on voit même alors des *caustiques* formées par l'intersection des rayons consécutifs (1446). Pour de petites ouvertures, l'aberration est insensible, mais jamais rigoureusement nulle, ce qui est un grave inconvénient pour les grandes lentilles. En supposant les rayons parallèles et l'indice égal à 1,5, le calcul démontre que l'aberration est la plus petite possible quand le rayon de courbure de la seconde face est 6 fois plus grand que celui de la première; la correction n'aurait plus lieu si on présentait la seconde face aux rayons. Pour $n=1,686$, valeur qui convient à peu près au flint-glass, la figure la plus avantageuse est celle d'une lentille plan-convexe, la surface courbe recevant les rayons. Du reste, en combinant deux lentilles de courbure convenable, on parvient à former un système rigoureusement *aplanétique*, c'est-à-dire dans lequel il n'y a plus d'aberration de sphéricité.

Image d'un 1527. Quand on place une bougie sur l'axe d'une lentille

convergente *à une distance plus grande que le foyer*, on obtient une image réelle comme avec les miroirs concaves (1448). La marche de cette image est également donnée par la formule $oi = 1$ (1449, 1450); mais il faut observer qu'il y a dans ce cas deux foyers, un de chaque côté de la lentille. Les distances de l'objet se comptent à partir d'un de ces foyers, les distances de l'image à partir de l'autre, et toujours en s'éloignant de la lentille; car jamais l'image réelle ne peut tomber entre la lentille et le foyer. point placé sur l'axe. Sa marche.

1528. La formule $oi = 1$ n'est qu'un cas particulier d'une formule plus générale, que nous allons maintenant établir. Soit L M une lentille convergente, O M un rayon incident parti d'un point O placé sur l'axe; M I le rayon réfracté. L'angle de déviation N M I étant extérieur au triangle, on a $NMI = MOL + MIL$; si on remplace, comme cela est permis, les angles supposés très petits par leurs tangentes, et si on observe que la déviation est la même que pour un rayon incident parallèle à l'axe (1524), il vient Formule des lentilles. Fig. 411.

$$\frac{LM}{LF} = \frac{LM}{LO} + \frac{LM}{LI} \text{ ou } \frac{1}{F} = \frac{1}{O} + \frac{1}{I}$$

en représentant par O et I les distances du point O, et du point I à la lentille.

La distance I, comme on le voit, ne dépend pas de l'angle que le rayon incident fait avec l'axe; elle varie seulement avec la distance O et le foyer F. Par conséquent tous les rayons qu'envoie le point lumineux à la lentille sont réfractés vers un même point, ce qui explique la formation de l'image.

Le point de croisement et le point lumineux sont dits *foyers conjugués* l'un de l'autre, parce que si le point lumineux était transporté au point de croisement, ce serait à l'ancienne place du point lumineux que les rayons iraient se croiser. Cela est évident, puisque la marche inverse de la lumière reste la même (1472). Foyers conjugués.

1529. Si on veut arriver à la formule $oi = 1$, il faut compter les distances, non plus à partir de la lentille, mais à partir de ses foyers; alors on a $LO = FO + LF$ ou Formule plus simple. Fig. 411.

$O = o + F$; et $LI = FI + LF$, ou $I = i + F$; mettant ces valeurs dans la formule (A), il vient $oi = F^2$, ou $oi = 1$, en prenant le foyer pour unité de longueur.

Image d'un point placé hors de l'axe.

1530. Jusqu'à présent nous avons supposé le point lumineux sur l'axe principal de la lentille; s'il n'y est pas, il est sur un certain axe oblique (1519). Or tout se passe, par rapport à cet axe oblique comme par rapport à l'axe principal, pourvu que l'inclinaison soit petite. On retombe en effet sur les mêmes formules en admettant que la tangente d'un très petit angle MOL reste encore sensiblement égale à $\frac{LM}{LO}$ lors même que l'angle en L n'est plus rigoureusement droit. Cette nouvelle approximation paraît un peu grossière, mais les résultats s'accordent très bien avec l'expérience, tant que l'inclinaison ne surpasse pas 2°.

Fig. 411.

Image réelle d'un objet.

1531. Sachant maintenant comment se forme l'image d'un point quelconque, nous pouvons concevoir aisément la formation de l'image d'un objet entier. Mais cette image est tout-à fait analogue à celle que donne un miroir concave; il y a le même renversement, les mêmes lois pour la grandeur et la distance; on n'a donc qu'à revoir ce que nous avons dit à ce sujet (1452); seulement, au lieu de *centre de courbure*, il faut lire *centre optique*. Les articles 1453 et 1454 s'appliquent aussi mot à mot.

Fig. 412.

Images virtuelles avec les lentilles convergentes. Comment ces lentilles grossissent.

1532. Quand l'objet est entre le foyer et la lentille, il n'y a plus d'image *réelle;* mais si on regarde à travers le verre, l'objet paraît amplifié. Pour concevoir ce phénomène, observons que quand un point lumineux est au foyer d'une lentille, celle-ci ne fait pas converger les rayons, elle les rend seulement parallèles; par conséquent, si le point lumineux est plus près que le foyer, tout ce que peut faire la lentille, c'est de diminuer la divergence. Ainsi les rayons émanés du point A prennent la même direction que s'ils provenaient du point A', situé derrière A, sur l'axe passant par ce point. Il en est de même du point B; de sorte que les choses se passent comme si le verre et l'objet AB n'existaient plus, et qu'il y eût un autre objet A'B' parfaitement semblable au premier, mais plus grand. Il est vrai que si on ôtait le verre sans déranger l'œil, l'objet AB soutendrait presque le même angle que A'B', mais de si près il ne présenterait que

Fig. 413.

confusion. Pour le bien voir on est obligé de l'éloigner, alors il soutend un angle plus petit, et c'est évidemment pour le cas de la vue distincte que se fait la comparaison des grandeurs.

1533. La distance de la vue distincte est d'environ 8 pouces ou 22 centimètres; ainsi, par cela seul que nous voyons distinctement l'image A′B′, nous pouvons affirmer qu'elle est à 8 pouces. Il faudrait mettre l'objet à la même distance pour le voir nettement à l'œil nu; les distances étant ainsi les mêmes, le grossissement est évidemment donné par le rapport $\frac{A'B'}{AB}$ des diamètres. Mais les triangles semblables montrent que ce rapport est le même que celui des distances au centre optique de la lentille, lesquelles sont à très peu près la distance D de la vue distincte, et la longueur focale F; car, d'une part, l'œil est très près de la lentille, et de l'autre l'expérience prouve qu'on met l'objet presque au foyer, pour le voir nettement. Par conséquent la mesure du grossissement est $\frac{D}{F}$; soit $D = 8$ pouces, $F = 1$ pouce, le grossissement sera de 8 fois. Mesure du grossissement

1534. Les distances de l'objet et de l'image virtuelle sont liées par la relation $\frac{1}{F} = \frac{1}{O} - \frac{1}{I}$ qu'on établit par un raisonnement analogue à celui que nous avons fait pour les images réelles (1528). Cette formule donne $\frac{I}{O} = \frac{I+F}{F}$; ce qui montre que la mesure exacte du grossissement est $\frac{D+F}{F}$; dans l'exemple précédent ce serait donc 9 fois au lieu de 8. Mais cette correction est de peu d'importance, parce que les limites de la vue distincte ne sont pas bien fixes. Formule des images virtuelles. Mesure plus exacte du grossissement

1535. Nous avons toujours supposé l'œil contre la lentille; si on l'éloigne, celle-ci demeurant à la même distance de l'objet, le grossissement reste à très peu près le même. Mais si après avoir reculé l'œil on fait voyager la lentille entre l'objet et lui, on obtient des grossissements variables et qui peuvent surpasser de beaucoup celui qu'on avait dans la position normale. L'effet est plus marqué avec les grandes Grossissement énorme.

lentilles qu'avec les petites. Nous avons observé un phénomène analogue avec les miroirs concaves (1464); la cause est évidemment la même, car l'objet se trouve alors au-delà du foyer.

Images virtuelles avec les lentilles divergentes. Fig. 414.

1536. Avec les lentilles divergentes il n'y a jamais que des images virtuelles. Soit A B un objet qu'on regarde à travers une lentille divergente; les rayons émanés du point A sont dispersés et prennent la même direction que s'ils provenaient du point A', plus voisin de la lentille que le point A et situé sur l'axe passant par ce point. Il en est de même du point B, de sorte que l'image virtuelle A' B' comprise dans le même angle que l'objet, mais plus voisine du sommet, se trouve nécessairement plus petite. On la verrait sous le même angle si l'œil était au centre optique de la lentille; mais comme il est plus loin, l'angle soutendu par l'image est plus petit que l'angle soutendu par l'objet.

Comment ces lentilles diminuent.

Formule des lentilles divergentes.

1537. La formule par les lentilles divergentes est

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{I} - \frac{1}{O}.$$

On l'établit par un raisonnement analogue à celui que nous avons fait par les lentilles convergentes (1528.)

Remarques sur les images virtuelles.

1538. Nous remarquerons que les images virtuelles sont toujours droites comme l'objet. Celles que donnent les lentilles convergentes sont plus loin que l'objet, mais elles paraissent plus près parce qu'elles sont plus grandes; c'est l'inverse avec les lentilles divergentes; l'image qu'elles donnent est toujours plus près que l'objet, et même elle reste toujours entre la lentille et le foyer, de sorte qu'elle est tout au plus à 4 pouces si telle est la longueur focale; si elle nous semble plus éloignée, c'est à cause de la petitesse.

Remarquons encore qu'avec les lentilles convergentes surtout, les images sont tellement parfaites que c'est l'objet lui-même que nous croyons voir. Aussi dans le langage ordinaire on rapporte à l'objet toutes les apparences qu'on aperçoit dans l'image; on dit qu'il est amplifié, rapproché, etc.

Instruments qui donnent des images réelles.

1539. Parmi les instruments formés de lentilles nous examinerons d'abord ceux qui donnent des images réelles. Si on ferme avec une lentille le trou d'une chambre noire *sim-*

ple (1389), on obtient une image infiniment plus vive et plus nette que celle qu'on avait auparavant. Celle des objets métalliques éclairés par le soleil est si brillante que l'œil a peine à en supporter l'éclat, et qu'aucune peinture ne peut lui être comparée. Le carton ou le verre dépoli qui reçoit l'image doit être à peu près au foyer de la lentille, parce que les objets sont ordinairement assez éloignés. Cette image est d'autant plus grande que le foyer est plus long, et d'autant plus éclairée que la lentille présente plus de surface. La diffusion qu'on observe toujours pour les parties trop éloignées de l'axe, est moindre avec les verres *périscopiques*, qui sont des ménisques dont la concavité est tournée vers l'objet; le meilleur rapport des rayons de courbure paraît être de 5 à 8. Chambre noire.

Un grand défaut de cette chambre noire, c'est que l'image est renversée; mais on peut la redresser avec un miroir. Dans les petites chambres noires à tirage, un miroir M incliné de 45° la renvoie sur un verre dépoli horizontal V, qu'un écran E préserve de la lumière étrangère. Dans les chambres noires pour dessiner le paysage, le miroir M est en dehors; on l'incline et on le tourne à volonté pour prendre les vues sur tous les points de l'horizon. Dans les chambres noires de Ch. Chevalier, un gros prisme ABC ayant une face convexe et l'autre concave ou plane remplace à la fois le miroir et la lentille. La lumière qui pénètre dans le prisme éprouve une réflexion totale sur la face AB, elle est d'ailleurs réfractée à son entrée et à sa sortie comme si elle traversait une lentille ayant la courbure des faces AC et BC du prisme. Le foyer est d'environ un mètre. Fig. 415. Fig. 416. Prisme-ménisque. Fig. 417.

La chambre noire formée par une lentille a été décrite pour la première fois par J.-B. Porta dans sa Magie naturelle, imprimée en 1560.

1540. Le *microscope solaire* est un instrument qui donne des images très amplifiées d'objets presque imperceptibles. Il a été inventé, vers le milieu du siècle dernier, par *Lieberkuyn*, de l'Académie des sciences de Berlin; depuis il a été considérablement perfectionné. Nous décrirons celui de Ch. Chevalier, qui est le plus parfait qu'on ait aujourd'hui. D'abord pour concevoir le principe sur lequel repose l'instrument, imaginons une lentille qui ait un centimètre de longueur focale; si on place un objet à $\frac{11}{10}$ de centimètre Microscope solaire. Fig. 418.

au-delà du foyer, on aura une image réelle à 1000 centimètres de l'autre foyer, et cette image sera 1000 fois aussi grande que l'objet (1531). La lumière qui émane de l'objet pour former cette image, étant répartie sur une surface un million de fois plus grande, serait insensible si on ne la recevait pas dans une chambre obscure, et si de plus l'objet n'était pas très fortement éclairé. On concentre donc sur lui avec deux lentilles L L, L'L', les rayons du soleil réfléchis par un miroir M fixé au volet de la chambre, et auquel on donne de temps en temps l'inclinaison convenable à l'aide des vis V V'. Une petite lentille appelée *focus* est destinée à rétrécir plus ou moins le foyer de la grande, et à le faire toujours tomber précisément sur l'objet, ce qu'on obtient facilement par le jeu des tubes T T', et par l'engrenage A. Tout cet appareil est *le porte-lumière*. Quant à l'objet, on le met ordinairement entre deux lames de verre appelées *porte-objet*, que l'on glisse dans l'intervalle des deux platines P P, P' P'. Un peu au-delà se trouve enfin la *lentille objective l l*, qui doit donner l'image; on règle sa distance par l'engrenage B. On obtient ainsi sur le mur ou sur une toile blanche un grand cercle éclairé O O, qui est l'image du petit cercle lumineux projeté par les premières lentilles sur le porte-objet. Si l'objet était opaque, on ne le verrait dans le cercle éclairé que par son ombre amplifiée, mais généralement les petits objets soumis à ces expériences sont demi-transparents, de sorte qu'ils se trouvent éclairés dans toute leur épaisseur, quoique les rayons ne tombent que sur une face. La plupart même ne sont pas laissés à sec entre les lames de verre; on les y met avec un liquide dont la réfringence approche de la leur, comme de la térébenthine, différentes huiles, etc. Alors la réflexion sur la surface est moindre, et la lumière pénètre en plus grande quantité. Aussi a-t-on une image, même des parties intérieures, peinte avec toutes les couleurs de l'objet et très vive, du moins tant que la chambre reste parfaitement close; car si on laisse pénétrer le jour, en ouvrant une porte par exemple, tout disparaît à l'instant.

Porte-lumière. Porte-objet.

Grossissement.

1541. Pour mesurer le grossissement, on met à la place de l'objet un verre portant une division très fine, par exemple le millimètre divisé en 100 parties; les traits gravés au

diamant se projettent comme des lignes opaques, et on n'a qu'à chercher combien l'image d'un intervalle contient de fois l'intervalle lui-même; connaissant le grossissement, il est aisé ensuite d'avoir les dimensions de l'objet d'après celle de son image.

Quand le grossissement est un peu considérable, les images données par une simple lentille sont chargées de couleurs étrangères qui les rendent confuses. On n'a pas cet inconvénient avec les lentilles *achromatiques* dont nous parlerons plus loin, et le grossissement alors peut être poussé jusqu'à 1000 ou 1200 fois. On l'augmente encore avec une lentille concave qui fait diverger les cônes de rayons dont le sommet forme la peinture de chaque point. Cependant, avec ces forts grossissements, l'image est comme une décoration de théâtre: elle paraît très nette de loin, mais il ne faudrait pas la considérer de trop près.

1542. Les expériences qu'on fait le plus ordinairement avec le microscope solaire sont la cristallisation des sels, notamment du sel ammoniac et du sulfate de soude; le gonflement et la rupture des grains de fécule; la circulation des globules dans le *chara;* la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans les pattes de grenouille; les mouvements dans les œufs de lymnée. Il y a ensuite une infinité de petits animaux vivants et de préparations d'histoire naturelle qu'on peut ainsi très bien étudier et dessiner. Cependant la chaleur qui se produit au foyer est quelquefois un obstacle; on peut la tempérer par l'interposition d'un verre vert. La nécessité du soleil restreint l'usage de ce microscope, mais on l'éclaire presque aussi bien par la lumière *Drummond* (1379); c'est ce qui constitue le *microscope à gaz.* Usages. Microscope à gaz.

1543. Le mégascope inventé par *Charles* donne l'image des objets qui ne sont plus microscopiques, par exemple des médailles, des statuettes, des bas-reliefs, des dessins, etc.; c'est réellement une espèce de chambre noire. L'objet est placé en dehors, devant la lentille, qui a 3 ou 4 pouces d'ouverture, et qui en donne à volonté, suivant la distance, une image amplifiée ou réduite. Ordinairement il y a deux lentilles; en variant leur distance on varie le grossissement. On peut concevoir que la première lentille présente à l'au- Mégascope.

tre une image virtuelle, et par conséquent déjà amplifiée. Quand les lentilles sont achromatiques, le grossissement peut aller à 20 fois. L'objet, mis à l'envers pour que l'image soit droite, doit être fortement éclairé par le soleil, soit directement, soit à l'aide de plusieurs miroirs.

Lanterne magique. 1544. D'après ce que nous venons de dire des instruments précédents, on s'expliquera sans peine les effets de la *lanterne magique* dont l'invention est due à Kircher.

Fantasmagorie. Quant à la *fantasmagorie*, ce n'est qu'une lanterne magique plus parfaite, qui projette les images sur un transparent derrière lequel elle est placée; portée sur des roulettes, elle s'éloigne ou s'approche, afin d'agrandir ou de diminuer l'image, qui semble ainsi s'avancer vers le spectateur ou se perdre dans l'éloignement, en restant toujours nette, parce qu'un mécanisme fait marcher les lentilles en même temps que les roues. Un diaphragme formé de pièces mobiles rétrécit plus ou moins l'ouverture, pour que l'intensité de la lumière diminue quand l'image paraît s'éloigner. Les objets sont peints sur des lames de verre noircies sur le reste de leur surface, de sorte que l'image paraît seule et sans être accompagnée d'un cercle lumineux. Des pièces opaques couvrent ou découvrent certaines parties de l'objet, ce qui donne des tableaux à mouvements. En réunissant les images de deux ou trois lanternes, on a des scènes extrêmement variées.

Instruments qui donnent des images virtuelles. 1545. Examinons maintenant les instruments qui donnent des images virtuelles, c'est-à-dire des images qui ne se peignent plus sur un écran. C'est le cas des *lunettes* ordinaires ou bésicles; mais nous ne nous en occuperons qu'à l'occasion des défauts de la vue. C'est encore le cas de la *loupe*, qui n'est qu'une lentille convergente d'un court foyer destinée à grossir les objets. Ce que nous avons dit précédemment (1532, 1533, 1534) suffit pour expliquer ses effets. Ici nous parlerons seulement des très petites loupes appelées *microscopes simples*. On en fait qui n'ont pas un millimètre de foyer, et qui par conséquent grossissent plus de 100 fois. Pour une même courbure, les petites lentilles de grenat, de saphir, et surtout de diamant, grossissent bien plus que celles de verre, puisque leur foyer est plus court (1524). Avec le diamant, l'effet est presque triplé; mais il est rare que le

Besicles. Loupe. Microscope simple.

diamant soit d'une pureté parfaite; le grossissement lui-même y décèle presque toujours des défauts. Une gouttelette de verre fondu à la pointe d'une aiguille, une goutte d'huile, ou même une simple goutte d'eau déposée sur un trou d'épingle, dans une feuille de métal ou sur un lame de verre, peuvent former des microscopes très puissants. *Hook* faisait ses observations avec des globules de verre fondu. *Leuwenhoeck*, *Spallanzani*, si célèbres aussi par leurs découvertes microscopiques, n'employaient que de simples lentilles; ils ne se servaient pas du microscope composé. Le *microscope de Raspail* n'est qu'un microscope simple, où la lentille est montée d'une manière commode pour les observations. Cependant, pour les grossissements qui dépassent 100 fois, le microscope simple a deux inconvénients capitaux : d'abord le champ, c'est-à-dire l'espace visible, devient extrêmement petit, parce que, à cause de la forte courbure de la lentille et du peu de distance de l'objet, les points tant soit peu écartés de l'axe principal envoient des rayons trop obliques pour pénétrer dans l'œil; ensuite la clarté diminue considérablement, parce que la lentille se trouve alors tellement petite, que le faisceau de rayons venant de chaque point est aussi étroit que s'il avait passé à travers un très petit trou d'épingle.

1546. Le microscope composé réduit à sa plus simple expression est formé de deux lentilles; l'une *aa*, d'un très court foyer, est placée près de l'objet O O de manière à donner une image réelle en D D; l'autre A A sert de loupe pour regarder cette image. On pourrait recevoir celle-ci sur un verre dépoli mis en D D; mais la peinture qu'on aurait alors ne vaudrait jamais l'image aérienne. Les tuyaux noircis à l'intérieur constituent une sorte de chambre noire, de sorte que l'œil ne reçoit pas d'autre lumière que celle qui vient de l'image. C'est par le jeu de ces tuyaux qu'on règle la distance des lentilles; la distance de l'objet se règle par la vis de rappel V. Avec deux simples lentilles, comme nous le supposons, les images, dans les grossissements un peu considérables, seraient chargées de couleurs étrangères; mais nous dirons, en parlant de l'achromatisme, comment on corrige ce défaut.

Microscope composé. Fig. 419.

1547. Pour éclairer l'objet, qui est disposé comme dans le microscope solaire (1540), il y a un miroir concave qu'on

Manière d'éclairer.

met à telle distance qu'on veut sous le porte-objet. On gradue la lumière à l'aide du diaphragme FG percé de différents trous, sous lesquels on met une lame E de verre dépoli quand on emploie la lumière solaire. Mais on ne se sert presque jamais que de la lumière du ciel réfléchie par le miroir. Le soir, celle d'une lampe suffit à la plupart des observations. Pour éclairer les objets opaques, on visse un petit miroir concave m à l'extrémité du tube; l'objet est alors placé sur un disque très étroit de verre noir, autour duquel passe la lumière que le grand miroir envoie au petit. On éclaire encore par dessus avec une lentille latérale l, ou un prisme convergent p. Il est quelquefois bon d'observer les objets demi-transparents dans la lumière directe; pour cela on fait basculer tout l'appareil sur la charnière B, et on dirige vers le ciel, comme une lunette, le tube avec le porte-objet.

Microscope d'Amici. 1548. Il est bien plus commode de regarder devant soi que de haut en bas, comme on le fait quand le tube est vertical; cette dernière position devient même insupportable quand les observations se prolongent. Par cela seul il y aurait un grand avantage à observer dans la lumière directe avec le tube à peu près horizontal. Mais alors le porte-objet n'étant plus horizontal, les objets ordinairement placés dans un liquide tendent toujours à descendre, ce qui est un grave inconvénient. Heureusement, M. Amici a imaginé une disposition qui permet d'avoir à la fois le tube et le porte-objet horizontaux. Le tube est coudé à angle droit un peu au-dessus de la lentille objective, qui reste avec le porte-objet et le grand miroir dans la position marquée par la figure. Dans le coude formé par le tube se trouve un petit miroir incliné de 45°, qui réfléchit les rayons suivant l'axe de la partie horizontale. La perte de lumière n'est pas considérable, parce que le miroir est un prisme sur lequel il y a réflexion totale. Le prisme s'enlève et les pièces se démontent pour qu'on puisse avoir à volonté le tube rectiligne.

Pièces accessoires d'un microscope. 1549. Un microscope a ordinairement une infinité de pièces accessoires qui étendent son emploi et le rendent plus commode. Nous indiquerons seulement les principales : — des lentilles et des oculaires de rechange pour varier le grossissement; — un micromètre : c'est ordinairement une lame

de verre portant le millimètre divisé en 100 parties; quelquefois c'est un appareil formé de pièces mobiles, dont la partie essentielle est une vis micrométrique; — un porte-objet mobile, qui permet de déplacer l'objet dans tous les sens par des mouvements très doux ordinairement dus à des vis de rappel; — le compresseur de *Purkinje*, à l'aide duquel on comprime l'objet par degrés insensibles, afin d'étudier la structure; — une chambre claire s'ajustant au tube du microscope, afin de dessiner les objets qu'on voit dans l'instrument (1433).

1550. Il est aisé de calculer le grossissement dans le microscope composé. Supposons l'objet à 6 lignes de la lentille objective et l'image réelle à 6 pouces; cette image sera 12 fois aussi grande que l'objet (1531), et elle paraîtra 8 fois plus grande qu'elle n'est, si le foyer de l'oculaire est contenu 8 fois dans la distance de la vue distincte (1533), de sorte que le grossissement définitif sera 12×8 ou 96. En général, soient O et I les distances de l'objet et de l'image réelle à la lentille objective; le rapport $\frac{I}{O} = \frac{I-f}{f}$ (1528) sera le rapport des grandeurs. Maintenant, soit F le foyer de l'oculaire, D la distance de la vue distincte, l'image virtuelle sera $\frac{D+F}{F}$ fois aussi grande que l'image réelle (1534), et par conséquent $\frac{I-f}{f} \cdot \frac{D+F}{F}$ fois aussi grande que l'objet. On peut négliger f devant I et F devant D; l'expression du grossissement se réduit alors à $\frac{DI}{Ff}$. Elle montre que les microscopes qui grossissent le plus sont ceux où le tuyau est le plus long, et où le foyer des verres est le plus court. Calcul du grossissement.

1551. La formule précédente est bonne pour montrer de quoi dépend le grossissement, mais non pour le mesurer, parce qu'il est très difficile d'avoir avec exactitude le foyer f d'une très petite lentille. Une méthode plus sûre consiste à comparer le micromètre, vu d'un œil dans l'instrument, avec une règle divisée, vue de l'autre œil en dehors. Avec un peu d'habitude on arrive à superposer les deux divisions. Si alors un centième de millimètre couvre un millimètre en- Mesure du grossissement.

tier, il est clair que le grossissement est de 100 fois. Mais la difficulté est de placer la règle à la même distance que l'image virtuelle ; il reste là toujours une chance d'erreur, à cause de l'incertitude des limites de la vue distincte. On peut aussi dessiner les divisions du micromètre avec la chambre claire, mais il reste la même incertitude sur la distance du papier ; les divisions qu'on y projette y occupent plus ou moins de place, suivant qu'il est plus ou moins loin. Afin de ne pas exagérer les grossissements, on peut admettre, terme moyen, 6 pouces pour la distance où l'on voit le plus nettement les très petits objets. Une fois qu'on connaît le grossissement, il est aisé de déterminer les dimensions absolues d'après le calque fait à la chambre claire.

Champ du microscope. 1552. De même que dans une chambre noire, l'image réelle dans le microscope n'a d'autres limites que celles qu'on lui donne ; c'est le tube ou le diaphragme qui déterminent sa largeur. Mais les points de cette image aérienne ne rayonnent pas de toutes parts comme si c'était un objet ou une peinture sur un verre dépoli. (Fig. 420.) Le point A, par exemple, n'envoie pas d'autres rayons que ceux qui, émanés du point a qu'il représente, ont traversé la lentille objective ; il serait donc invisible si l'oculaire n'avait pas une certaine largeur. Dans les constructions adoptées, l'oculaire est toujours assez large pour recevoir les rayons de toute l'image circonscrite par le diaphragme D D, de sorte que c'est celui-ci qui détermine réellement les limites du *champ* ou l'étendue visible.

Quand on applique l'œil immédiatement contre un oculaire d'un foyer un peu long, on ne voit qu'une petite partie de l'objet ; le champ s'agrandit à mesure qu'on s'éloigne, puis il diminue si on dépasse une certaine distance. Pour concevoir ce phénomène, suivons la marche du rayon, qui, émané d'un point quelconque a, passe par le centre optique de la lentille objective. Ce rayon est réfracté par l'oculaire de manière à rencontrer l'axe principal en un certain point I, et comme il est lui-même l'axe du faisceau de rayons provenant du point a, que ce faisceau est fort étroit et presque confondu avec lui, il est clair que l'œil doit se mettre en I pour recevoir les rayons émanés du point a. Or, il est évident que l'axe du faisceau de rayons provenant de tout

autre point doit aboutir au même point I; car il passe aussi par le centre optique, qu'on peut dès lors considérer comme un point lumineux dont le point I serait le foyer conjugué (1528). Par conséquent, c'est en I que l'œil doit se mettre pour recevoir tous les rayons que laisse passer le diaphragme; et l'*œilleton* vissé sur l'oculaire n'a pas d'autre usage que de maintenir l'œil en ce point d'où le champ est le plus grand possible. On verra sans peine que la distance C I est un peu plus grande que le foyer de l'oculaire.

1553. Tous les microscopes maintenant ont un verre intermédiaire appelé *oculaire de Campani*, qui agrandit le champ, sans que pour cela l'image soit moins nette, comme cela aurait lieu en retranchant le diaphragme. C'est une lentille convergente très large qui se place entre la lentille objective et l'image réelle, de manière à ramener dans le cercle du diaphragme les faisceaux de rayons qui eussent été perdus pour l'œil. L'image est, à la vérité, plus petite, mais elle est beaucoup plus nette, et peut dès lors supporter un grossissement plus considérable. Pour ce grossissement, l'oculaire proprement dit doit être d'un plus court foyer, d'où il suit qu'il a moins de largeur; mais il peut malgré cela recevoir les rayons qui viennent des points extérieurs de l'image à cause de la direction plus favorable qui leur est imprimée par l'oculaire de Campani. Nous verrons en parlant de l'achromatisme que l'oculaire de Campani a encore l'avantage de détruire les couleurs étrangères quand il est choisi et placé convenablement. Dans les bons microscopes, chaque oculaire de rechange porte son oculaire de Campani. Oculaire de Campani.

1554. Dans tous les cas, le champ se mesure par le nombre de divisions du micromètre qu'on peut apercevoir dans le diaphragme. Ce nombre est évidemment proportionnel au diamètre d du diaphragme, et en raison inverse du grossissement $\frac{1-f}{f}$ dû à la lentille objective, de sorte que le champ peut être représenté par $\frac{df}{1-f}$. On voit qu'il diminue quand on allonge le tube, ou quand on prend des lentilles objectives d'un plus court foyer; mais il ne change pas quand on grossit par les oculaires. Mesure du champ.

1555. Soit 1 la quantité de lumière qu'envoie un objet Mesure de la clarté.

sur l'unité de surface à l'unité de distance; la lumière reçue à la distance O par la lentille objective, dont la surface est s sera $\frac{s}{O^2}$. C'est cette lumière qui forme en définitive l'image dans l'œil. Celui-ci, sans le microscope, recevrait à la distance D de la vue distincte une quantité de lumière représentée par $\frac{s'}{D^2}$; s' étant la surface de l'œil qui admet les rayons. Pour comparer la clarté qui résulte de ces deux lumières il faut observer que la première est répartie dans l'œil sur une surface G^2 fois aussi grande, si le grossissement en diamètre est G. D'après cela, le rapport des lumières reçues sur une même étendue du fond de l'œil est

$$\frac{s}{G^2\,O^2} : \frac{s'}{D^2} = \left(\frac{D\,l}{O\,l'\,G}\right)^2$$

en remplaçant les surfaces s, s' par les carrés des diamètres l, l'. Cette expression montre que la clarté est proportionnelle à la surface de la lentille objective et en raison inverse du grossissement en surface. Prenons $D = 6$ pouces $= 162^{mm}$; $O = 2^{mm}$ $l = l'$, $G = 300$; nous aurons $\frac{1}{14}$ environ pour la mesure de la clarté; mais comme avec le miroir concave on éclaire très fortement, l'image en définitive pourra être aussi claire que l'objet dans les circonstances ordinaires.

La clarté de l'image réelle vue sans oculaire a pour mesure $\left(\frac{D\,l}{O\,l'\,g}\right)^2$. g étant le grossissement dû à la lentille objective, si on suppose $g = 20$, on trouve que dans l'exemple précédent l'image réelle, quoique ayant une surface 400 fois plus grande que celle de l'objet, serait cependant 16 fois plus claire même sans le miroir. Cela s'explique en observant que la lentille objective est 81 fois plus près que l'œil, et qu'elle reçoit par conséquent environ 6500 fois plus de lumière.

Usages du microscope. 1556. L'inventeur du microscope composé est inconnu; on sait seulement par Huygens que Drebbel, son compatriote, en fabriquait à Londres dès l'année 1621. Cet in-

strument est resté long-temps imparfait, aussi lui préférait-on généralement le microscope simple; mais maintenant, surtout depuis les perfectionnements dus à M. Amici, l'usage du microscope composé s'est beaucoup répandu, et chaque jour il donne lieu à des découvertes nouvelles. Parmi les plus récentes, nous indiquerons les détails d'anatomie végétale dus à M. Mirbel, le mécanisme de la fécondation des plantes par M. Brongniart, la structure de l'amidon par MM. Raspail et Payen, l'organisation des globules du sang par MM. Prévot et Dumas, le mécanisme de la circulation du chara par M. Donné, de la fermentation par M. Cagniard Latour, les canaux des nerfs, les animalcules fossiles par M. Erhenberg, etc. L'instrument, comme on le voit, s'applique surtout aux recherches d'histoire naturelle, d'anatomie et de chimie organique. Il est bien supérieur au microscope solaire pour la finesse des détails et la petitesse des objets qu'il permet d'apercevoir : le microscope solaire n'est réellement bon que pour les objets qu'on voit déjà à l'œil nu.

On juge de la bonté d'un microscope en y examinant certains objets d'épreuve. L'instrument est très bon s'il permet de compter les stries transversales sur les lignes longitudinales des écailles du papillon de chou, ou les lignes diagonales sur les écailles de *podura*. Les meilleurs microscopes aujourd'hui sont ceux de M. Ch. Chevalier; les grossissements de 5 à 600 fois en diamètre y sont encore d'une grande netteté.

L'emploi du microscope composé présente d'assez grandes difficultés; au commencement, on a beaucoup de peine seulement à placer l'objet au foyer, et il faut bien des tâtonnements pour l'éclairer d'une manière convenable. Il y a ensuite une foule d'illusions à craindre : on ne sait pas d'abord si certains corps sont opaques ou transparents; on les voit changer continuellement de forme et d'aspect suivant la manière dont la lumière leur arrive. La *diffraction*, dont nous parlerons par la suite, occasionne, surtout au soleil, des franges qui compliquent étrangement les apparences. Il faut une longue pratique et beaucoup de sagacité pour arriver à la vérité à travers toutes ces causes d'erreur.

1557. On construit avec des lentilles des instruments qui **Lunettes ou**

télescopes réfracteurs. font voir de loin et qu'on appelle, en général, *lunettes* ou télescopes de réfraction. La lunette la plus simple est

Lunette astronomique. Fig. 421. la lunette astronomique : elle se compose de 2 lentilles convergentes. L'une, A B, tournée vers l'objet, s'appelle l'*objectif;* l'autre, C D, contre laquelle on applique l'œil, se nomme l'*oculaire*. L'objectif, ordinairement d'un long foyer, donne une image réelle E G, comme dans la chambre noire (1539), qui est ici constituée par le tube de la lunette; mais, au lieu de recevoir cette image sur un plan, on la laisse se former dans l'air et on la regarde à la loupe comme dans le microscope (1546). Elle est à la vérité renversée, mais cela importe peu, tant qu'il s'agit des astres. La figure représente la marche des rayons provenant de la partie moyenne et d'une extrémité de l'objet. Ceux que l'objectif reçoit d'un même point sont presque parallèles à cause de la grande distance; aussi l'image se forme-t-elle au foyer de ce verre. A partir de là, les rayons qui s'étaient croisés marchent en divergeant vers l'oculaire dont la distance, comme celle d'une loupe, est à peu près égale à la longueur focale (1533). Il suit de là que les rayons émanés d'un point quelconque G de l'image sont réfractés de manière à devenir parallèles à l'axe G M passant par ce point. On voit que l'intervalle des verres est précisément la somme $F + f$ des foyers; c'est aussi la longueur de la lunette quand on ne compte pas l'*œilleton* qui détermine la position de l'œil (1552). Pour les objets terrestres, l'image se forme un peu plus loin que le foyer des rayons parallèles; alors on est obligé d'allonger le tube, mais cet allongement est peu de chose, à moins que l'objet ne soit très proche. Il y a aussi une petite variation due à ce que chacun éloigne ou rapproche l'oculaire de l'image, suivant la portée de sa vue.

Fils micrométriques. Les lunettes astronomiques ont ordinairement des fils d'araignée ou des fils métalliques excessivement fins tendus dans l'endroit même où se forme l'image réelle, de sorte qu'on les voit avec la même netteté qu'elle. Ces fils, qui servent de repère ou de mesure, ont différentes dispositions; tantôt ils sont fixes, tantôt ils sont mobiles par des vis micrométriques; mais, en général, il y en a deux qui se croisent précisément sur l'axe principal des verres, qui prend le nom d'*axe optique* de la lunette. C'est au moyen de ces fils qu'on

reconnaît si un objectif est bien centré ; il faut qu'en le faisant tourner dans la châsse, l'image n'éprouve aucun dérangement (1517).

1558. Pour mesurer le grossissement dans une lunette, il n'y a qu'à chercher combien l'angle sous lequel on voit l'image contient de fois l'angle sous lequel on voit l'objet. Le demi diamètre de l'image est vu sous l'angle M O N = I M G : le demi-diamètre de l'objet soutendrait à l'œil nu l'angle S L S' = I L G ; la mesure du grossissement est donc $\frac{IMG}{ILG}$, rapport qui se réduit à $\frac{F}{f}$ quand on remplace les angles (supposés très petits) par leurs tangentes $\frac{IG}{f}$ et $\frac{IG}{F}$. Si l'on a, par exemple, F = 30 pouces et f = 2 pouces, le grossissement sera de 15 fois. On retombe facilement sur ce résultat en se rappelant que l'effet d'une loupe n'est réellement pas de grossir, mais de faire voir nettement de près (1532). Or, puisque l'image vue du centre de l'objectif soutend le même angle que l'objet, elle paraîtrait grande comme l'objet, si on la regardait à l'œil nu d'une distance de 30 pouces ; mais puisqu'on la voit à 2 pouces, elle doit paraître 15 fois plus grande. La mesure $\frac{F}{f}$ du grossissement montre qu'il est d'autant plus considérable que le foyer de l'objectif est plus long, et que le foyer de l'oculaire est plus court. Calcul de grossissement. Fig. 421.

Remarquons ici que dans une lunette les objets paraissent plutôt rapprochés que grossis : la peinture sur le fond de notre œil étant plus grande, nous éprouvons le même effet que si l'objet était plus près ; lors donc qu'on dit d'une lunette qu'elle grossit 15 fois, il faut entendre qu'elle fait voir les objets comme si leur distance était 15 fois moindre. Remarque.

1559. A la rigueur, l'image n'est pas au foyer de l'oculaire, sa distance varie suivant la portée de la vue : il suit de là qu'en général I M G n'est pas égal à M O N, et que si on veut une mesure rigoureuse du grossissement, c'est le rapport $\frac{MON}{MLN}$ qu'il faut calculer. Ce rapport se réduit à $\frac{ML}{MO}$, quand on remplace les angles par leurs tangentes $\frac{MN}{MO}$ et Influence de la portée de la vue. Fig. 421.

$\frac{MN}{ML}$. Or le point O étant le foyer conjugué du point L (1552), la formule des lentilles (1528) devient $\frac{1}{f}=\frac{1}{ML}+\frac{1}{MO}$, d'où $\frac{ML}{MO}=\frac{ML-f}{f}$, ce qui fournit cette règle : de l'intervalle M L des verres retranchez le foyer f de l'oculaire ; divisez le reste par ce même foyer, vous aurez le grossissement. Mais cette nouvelle mesure ne peut jamais donner une unité de différence, de sorte qu'elle est sans importance pour les grossissements un peu considérables. En effet on a $ML = F + x$, x étant la distance de l'image réelle à l'oculaire ; de plus $x=\frac{fD}{f+D}$ (1534), ce qui donne pour la mesure exacte $\frac{F}{f}-\frac{f}{f+D}$. Ici, par exemple, on aurait $15-\frac{1}{9}$, en supposant D = 8 pouces.

Elle est négligeable.

Procédé de Ramsden pour mesurer le grossissement.

1560. Quand une lunette est tournée vers le ciel, et qu'on regarde de loin l'oculaire, on voit un petit cercle brillant qui est l'image réelle de l'objectif (1552). On peut mesurer cette image en la recevant sur un verre divisé ; cherchant ensuite combien son diamètre est contenu de fois dans celui de l'objectif, on a la mesure du grossissement. En effet le rapport des diamètres est égal au rapport des distances (1531), et nous venons de voir (1559) que le rapport $\frac{ML}{MO}$ des distances était la mesure exacte du grossissement.

Procédé de Galilée.

1561. Mais le procédé le plus direct est celui qu'employait Galilée. Il consiste à regarder à la fois avec la lunette et à l'œil nu deux cercles inégaux tracés sur une mire très éloignée ; il est clair que le grossissement est donné par le rapport des diamètres, quand le petit cercle couvre exactement le grand. En parlant de la double réfraction, nous indiquerons un procédé plus commode encore dû à M. Arago.

Champ d'une lunette.

1562. Le *champ* ou l'étendue visible dans une lunette ne dépend pas de la largeur de l'objectif : quelque étroit que soit celui-ci, l'image réelle occupe toujours toute la largeur du tube ; cela est évident par l'analogie avec la chambre

noire. Mais la portion visible de cette image dépend de la largeur de l'oculaire; le point G, par exemple, serait invisible si l'oculaire n'avait pas une certaine largeur; car, ainsi que nous l'avons déjà vu pour le microscope (1552), les points d'une image aérienne ne rayonnent que dans des directions déterminées. Cependant, pour l'ordinaire, on limite encore le champ par un diaphragme placé dans le lieu même de l'image dont il ne laisse à découvert que la partie centrale. Il est évident, du reste, que pour jouir de la totalité du champ, il faut placer l'œil en un certain point O, qui est le foyer conjugué du centre de l'objectif (1552) ou le lieu du petit cercle de *Ramsden*. Fig. 421.

1563. Le champ d'une lunette se mesure en degrés. Si, par exemple, on découvre précisément le disque entier du soleil, on peut conclure que le champ est d'un demi-degré, car tel est à peu près l'angle soutendu par le diamètre du soleil. En général, on a le champ très exactement par le temps qu'une étoile équatoriale met à traverser la lunette en se fondant sur ce qu'elle parcourt 1° en 4′. Sa mesure.

Soit $IG = a$, le demi-diamètre du diaphragme, $LI = F$ le foyer de l'objectif; en observant que la mesure du champ est l'angle soutendu par le diaphragme vu du centre de l'objectif, on a tangente $\frac{1}{2}$ champ $= \frac{a}{F}$. Fig. 421.

Cette expression montre que pour le même diaphragme et le même oculaire, le champ diminue à mesure que le foyer de l'objectif augmente, c'est-à-dire à mesure que la lunette est plus longue et qu'elle grossit davantage (1558). Le champ est même à peu près en raison inverse du grossissement produit par l'objectif. Il diminue encore quand on grossit par l'oculaire, parce que celui-ci ayant alors un foyer plus court, son diamètre est moindre, ce qui nécessite un plus petit diaphragme. Relation avec la longueur de la lunette et le grossissement.

1564. Afin de mesurer la *clarté* que donne une lunette, nous prendrons pour unité la clarté à l'œil nu, et nous admettrons que toute la lumière reçue par l'objectif entre dans l'œil. Si d'abord l'ouverture de l'objectif est seulement égale à celle de la pupille, et si la lunette grossit, par exemple, 10 fois en diamètre, la lumière au fond de l'œil sera répartie sur une surface 100 fois plus grande, de sorte que Mesure de la clarté dans une lunette.

son intensité sera $\frac{1}{100}$. Mais si l'objectif est 5 fois aussi large que la pupille, il recevra 25 fois autant de lumière, et alors l'intensité sera 25 fois $\frac{1}{100}$ ou $\frac{1}{4}$. En général, G étant le grossissement en diamètre, A le rapport entre le diamètre de l'objectif et de la pupille, on aura $\left(\frac{A}{G}\right)^2$ pour la mesure de la clarté.

Autre mesure. Soit D le diamètre de l'objectif et d celui du petit cercle de Ramsden (1560), nous savons qu'on a $G = \frac{D}{d}$; de plus, p étant le diamètre de la pupille, A est égal à $\frac{D}{p}$. Avec ces deux valeurs, l'expression $\left(\frac{A}{G}\right)^2$ devient $\left(\frac{d}{p}\right)^2$, d'où l'on voit que la mesure de la clarté est donnée par le rapport entre le cercle de Ramsden et la surface de la pupille. Il suffira donc d'examiner le petit cercle brillant qui est en avant de l'oculaire pour avoir une idée de la clarté que donne la lunette.

Clarté ordinaire. L'expérience prouve que dans les observations astronomiques une ouverture de 36 lignes suffit pour un grossissement de 100 fois. En admettant une ligne pour le diamètre de la pupille, on voit que la clarté, dans ce cas, est $\left(\frac{36}{100}\right)^2$ ou $\frac{1}{8}$ environ. Souvent même on se contente de $\frac{1}{30}$; en général, on peut estimer le plus fort grossissement que la clarté comporte à 5 ou 6 fois l'ouverture mesurée en lignes; car les grands réfracteurs ayant environ 9 pouces d'ouverture, supportent des grossissements de 6 ou 700 fois; mais cela n'est possible que pour les astres. Pour les objets terrestres il y a déjà de l'obscurité quand la clarté est réduite à $\frac{1}{4}$; il faut, au moins, $\frac{1}{2}$; de sorte qu'avec une ouverture de 48 lignes, on ne doit pas grossir plus de 70 fois, à moins que les objets ne soient éclairés par le soleil. Il ne faut cependant pas croire qu'on puisse toujours augmenter le grossissement à mesure que la clarté augmente; car le faisceau de rayons qui entre dans l'oculaire pour peindre chaque point dans l'œil, est d'autant plus étroit que l'on grossit davantage; et quand il est trop mince, les imperfec-

Relation avec le grossissement.

tions des verres et des humeurs de l'œil s'arrêtent ou se dévient trop facilement, de sorte que l'image devient diffuse. Voilà pourquoi les astres qui sont plus près du soleil ne comportent pas des grossissements beaucoup plus forts que les autres. Et il est évident que pour le soleil lui-même, la limite du grossissement n'est pas donnée par le défaut de clarté, puisqu'on est obligé de tempérer la lumière avec des verres noircis.

1565. Il est à remarquer qu'une surface vue dans une lunette, celle du soleil, par exemple, ne peut jamais paraître plus claire qu'à l'œil nu. En effet, considérons les rayons émanés du point I; soit d le diamètre du cercle qu'ils forment sur l'oculaire; on a par les triangles semblables $D : d :: F : f$. Évidemment la clarté est la plus grande possible quand d est égal au diamètre p de la pupille; mais alors le premier rapport devient $\frac{D}{p} = A$; et comme $\frac{F}{f} = G$, la proportion donne $\frac{A}{G} = 1$; ainsi la clarté est égale à l'unité quand elle est la plus grande possible. Cela est d'ailleurs évident par l'expression $\left(\frac{d}{p}\right)^2$. On peut bien, à la vérité, faire une lunette qui donne $d > p$, mais alors il y a des rayons qui n'entrent pas dans l'œil. Les lunettes de nuit dont on se sert sur mer ont une très grande ouverture, non pas pour faire voir les objets plus clairs, mais pour les faire voir aussi clairs, tout en les agrandissant.

La clarté n'est pas plus grande qu'à l'œil nu.

Fig. 421.

1556. Lorsque la peinture de l'objet sur le fond de l'œil se réduit à un point, les raisonnements précédents ne s'appliquent plus. Alors, en supposant toujours que toute la lumière reçue par l'objectif entre dans l'œil, la mesure de la clarté est A^2; c'est-à-dire que si le diamètre de l'objectif est 100 fois celui de la pupille, la clarté sera augmentée 10,000 fois. Voilà pourquoi les lunettes à large ouverture font distinguer les étoiles invisibles à l'œil nu, et les petites planètes; le grossissement dans ce cas est à peu près sans influence. Et, si dans le jour on voit les étoiles avec une lunette, c'est que le fond du ciel, qui est une surface, paraît tout au plus aussi clair qu'à l'œil nu, tandis que l'étoile, qui n'est qu'un point, se peint avec une plus grande quantité de lumière.

Exception pour le cas d'un point.

Visibilité des étoiles dans le jour.

Il est évident qu'à égalité d'ouverture l'effet doit être plus marqué pour un fort grossissement, puisque alors le fond du ciel se trouve assombri; mais il y a une limite provenant, comme nous l'avons vu tout à l'heure, de l'étroitesse du faisceau qui doit peindre l'étoile dans l'œil.

Netteté de l'image. 1567. Avant l'invention des objectifs achromatiques, on était obligé de donner aux lunettes une longueur énorme pour obtenir de la netteté avec un fort grossissement. Pour concevoir cela, supposons qu'on veuille grossir 100 fois; il faut alors que l'objectif ait environ 3 pouces d'ouverture (1564). Si on ne lui donne que 2 ou 3 pieds de foyer, l'arc de courbure de ses faces comprendra plusieurs degrés, de sorte que l'aberration de sphéricité sera très considérable (1526). Les défauts qui en résulteront dans l'image seront fortement grossis par l'oculaire, dont le foyer sera très court, puisque, pour le grossissement demandé, il ne doit être que la centième partie du foyer de l'objectif (1558). Mais l'aberration de réfrangibilité, dont nous parlerons par la suite, nuit à la netteté bien plus encore que l'aberration de sphéricité. Par cette double raison, pour un grossissement de 100 fois, on ne peut pas donner plus d'un demi-degré aux arcs de courbure de l'objectif, ce qui entraîne un foyer de 25 pieds; celui de l'oculaire est alors de 3 pouces. Voilà comment les lunettes des observatoires, pour des grossissements de 300 fois au plus, avaient jusqu'à 130 pieds de long. Maintenant, grâce aux objectifs achromatiques, quoique l'ouverture ait été portée jusqu'à 12 pouces et le grossissement jusqu'à 1000 ou 1200 fois, les plus grandes lunettes n'ont guère que 25 pieds. La grande lunette de l'Observatoire de Paris, construite par Lerebours, n'a même que 10 pieds de foyer pour une ouverture *réelle* de plus de 8 pouces; cependant les grossissements de 5 à 600 fois y sont d'une netteté parfaite. Le même artiste a construit des lunettes de 45 lignes d'ouverture ayant seulement 32 pouces de foyer, et pouvant grossir jusqu'à 2 ou 300 fois.

Oculaires composés. 1568. Dans les bonnes lunettes astronomiques l'oculaire n'est jamais simple; on ajoute généralement l'oculaire de Campani comme dans les microscopes (1553). Quand l'instrument doit servir à des mesures, on emploie de préférence l'oculaire de *Ramsden*, qui est une lentille conver-

gente dont le foyer et la distance sont déterminés de manière à détruire les couleurs accidentelles comme le fait l'oculaire de Campani; mais en outre, comme cette lentille est placée entre l'image et l'oculaire proprement dit, le tube qui porte les deux verres se tire ou s'enfonce, suivant la portée de la vue, sans qu'on risque de déranger les fils tendus au foyer de l'objectif. La première lentille étant fort large, elle reçoit les rayons des parties extérieures de l'image, de sorte que le champ se trouve agrandi comme avec l'oculaire de Campani. Il est à noter que le procédé de Ramsden pour mesurer le grossissement (1560) s'applique encore au cas des oculaires composés.

1569. Les dimensions d'une lunette ne donnent que des notions approximatives sur sa valeur; la pureté des verres, la perfection de leur courbure, leur ajustement, ont une telle influence qu'on ne peut bien juger l'instrument que par des essais directs. Voici ceux qu'on fait le plus ordinairement : — voir les satellites de Jupiter; — Vénus en croissant; — l'anneau de Saturne; — la petite étoile de la polaire; — les bandes de Jupiter; — les étoiles quadruples ϵ de la Lyre, α, ζ du Verseau, α d'Hercule; — les petites étoiles dans α de la Lyre, dans Aldébaran, Rigel, ξ du Bouvier; — la résolution en étoiles de la Nébuleuse entre η et δ d'Ophiucus; — la ceinture de Saturne; — les lignes de séparation de ses anneaux; — son premier satellite; — l'étoile double ω du Lion. Ces derniers essais ne doivent être tentés qu'avec les grandes lunettes d'au moins 5 pouces d'ouverture; les premiers conviennent à des lunettes de 2 ou 3 pouces grossissant de 30 à 60 fois. Les autres demandent une ouverture d'à peu près 4 pouces avec une amplification de 100 à 200. Dans tous les cas, un objectif est excellent lorsque, pour les plus forts grossissements que la clarté comporte (1564), il fait voir les étoiles comme des points parfaitement ronds, et le disque des planètes bien nettement terminé sans aucune frange colorée. Il est évident du reste qu'on doit tenir compte de la pureté de l'atmosphère et de la hauteur de l'astre sur l'horizon. Les essais sur les objets terrestres, comme la distance où l'on peut voir dans la campagne, où l'on peut lire, etc., n'ont que peu de valeur. D'ailleurs certains défauts des verres, les stries par exemple,

Essai d'une lunette.

ne se voient bien qu'avec des objets lumineux projetés sur un fond noir.

Comparaison des lunettes et des télescopes.

1570. En appelant a l'angle soutendu par le demi-diamètre d'un objet, on a $\frac{F^2}{f'}$ tg a pour la grandeur absolue de l'image dans le télescope de Grégori (1459). Vue avec un oculaire dont le foyer est f, cette image soutend un angle dont la tangente est $\frac{F^2}{ff'}$ tg a; en divisant par tg a, qu'on peut supposer aussi petit qu'on veut, on a le rapport des angles soutendus par l'image et par l'objet, c'est-à-dire la mesure du grossissement qui est ainsi $\frac{F^2}{ff'}$. On voit que, pour une même longueur et un même oculaire, le grossissement est plus grand qu'avec une lunette (1558); si, par exemple, $f=f'$, l'un des grossissements est le carré de l'autre. Mais en outre la réflexion n'introduisant pas de couleurs étrangères comme la réfraction, on peut employer des oculaires d'un foyer très court, si bien qu'un bon télescope grégorien de 16 pouces grossit autant qu'une lunette de 16 pieds à objectif simple. C'est ce qui a donné l'avantage aux télescopes tant qu'on n'a pas su faire les objectifs achromatiques. Aujourd'hui, à égalité de longueur on obtient à peu près les mêmes grossissements, pourvu que l'ouverture du télescope soit au moins double de celle de la lunette; car la lumière s'affaiblit bien plus sur les miroirs qu'en traversant l'objectif (1426, 1392). Il y aurait déjà là un motif de préférence pour les lunettes; mais il y en a deux autres plus importants encore. C'est d'abord que les imperfections des surfaces sont 5 ou 6 fois plus considérables pour la réflexion que pour la réfraction, et qu'ensuite un objectif a une durée indéfinie, tandis qu'un miroir s'altère avec la plus grande facilité. Pendant son séjour au Cap, après quelques nuits de service, Herschel était obligé de faire repolir ses miroirs; aussi comptait-il beaucoup plus sur un objectif de 5 pouces seulement, mais d'une perfection admirable, que sur ses grands miroirs. Maintenant, dans les observations, les *réfracteurs* sont universellement préférés; les grands réflecteurs sont à peu près sans usage; mais pour les amateurs, et quand il s'agit seulement

d'une moyenne dimension, il y a, du moins aujourd'hui, de l'avantage à prendre un télescope. L'instrument est beaucoup plus puissant qu'une lunette du même prix. Pour les très petites dimensions les télescopes ont encore l'avantage; un artiste anglais nommé *Short* en a construit qui, avec une longueur de 4 pouces, faisaient voir les satellites de Jupiter, et permettaient de lire les *Transactions philosophiques* à 125 pieds de distance. Avec ceux de 15 pouces on lisait à 500 pieds et on voyait les satellites de Saturne.

1571. La lunette terrestre n'est qu'une lunette astronomique dans laquelle on a redressé l'image. Ce redressement peut à la rigueur se faire avec un seul verre; mais on en emploie toujours deux, parce qu'alors on évite mieux les couleurs étrangères. Soit M N l'objet, A B l'objectif, *n m* l'image qu'il forme; les *oculaires intermédiaires* CD, EF, donnent de cette image renversée une image droite *m'n'* que l'œil placé en O voit à travers l'oculaire GH. Dans la disposition la plus simple, les 3 oculaires sont équidistants et de même foyer; leur distance est à peu près le double de la longueur focale, et l'intervalle de la première image au foyer de l'oculaire est égal au foyer de celui-ci. Alors le grossissement, le champ et la clarté restent les mêmes que dans la lunette astronomique; mais la longueur est $F + 6f$ en comptant la distance de l'œil.

Lunette terrestre ou longue-vue.

Fig. 422.

Mais cela n'est qu'un cas particulier; on se fait une idée plus générale de la lunette terrestre en la décomposant en deux lunettes astronomiques mises bout à bout et regardant l'une dans l'autre. La 1re, composée de l'objectif A B et de l'oculaire C D, présente à l'autre une image virtuelle renversée, située à une assez grande distance et soutendant un angle plus grand que l'objet. La 2e lunette composée de l'objectif E F et de l'oculaire G H, fait, par rapport à cette image, ce que la 1re lunette a fait par rapport à l'objet, de sorte que l'image présentée à l'œil se trouve droite. La grandeur apparente dépend des deux lunettes : si la 1re grossit 10 fois et la 2e 3 fois, le grossissement définitif est 30. Observons que le premier oculaire C D ne servant plus à la vision peut être fortement rapproché de l'image *n m*; alors l'image virtuelle qu'il en présente à la lentille E F n'est pas très éloignée, et l'image réelle qu'en donne cette lentille se

trouve par cela même plus grande; seulement elle se forme plus loin que le foyer, ce qui force à allonger le tube. On conçoit d'après cela que par le déplacement des verres on puisse obtenir différents grossissements, l'image restant toujours distincte; c'est ce qu'on réalise dans les lunettes *polyaldes*.

Champ dans la lunette terrestre.

1572. L'expérience prouve que le champ est plus ou moins étendu suivant la distance des verres CD, EF; il est le plus grand possible quand cette distance est un peu plus grande que la somme des foyers. Pour en sentir la raison, rappelons-nous d'abord que le point de croisement L est le lieu de l'image de l'objectif AB (1560), et que par conséquent la distance de ce point à l'oculaire CD est un peu plus grande que le foyer de ce verre. Si, de même, la distance de l'autre verre est un peu plus grande que son foyer, les axes des faisceaux de rayons seront rendus un peu convergents vers l'axe de la lunette, de sorte que les plus extérieurs tomberont encore sur l'oculaire GH, quoiqu'il soit d'un diamètre plus petit. (Il ne faut cependant pas trop éloigner le verre EF, car alors une partie des rayons lui échapperait.) Si au contraire la distance au point L était moindre que son foyer, les axes des faisceaux réfractés resteraient divergents et pourraient très bien ne plus rencontrer l'oculaire. Cet inconvénient serait encore plus marqué si on plaçait l'oculaire EF en deçà du point L. Quand on emploie l'oculaire de Campani, on le met entre le verre EF et la dernière image; comme il tend à ramener les rayons vers l'axe et qu'il est fort large, il permet de rapprocher beaucoup le verre EF du point L. C'est en ce point et dans le lieu où se forme la dernière image qu'on établit les diaphragmes.

Lorgnette ou lunette de Galilée. Fig. 423.

1573. La lorgnette se compose d'un objectif A qui tend à former une image réelle renversée SP; et d'un oculaire divergent B qui donne aux rayons la même direction que s'ils provenaient d'un objet P′S′ droit et rapproché. La distance BC de l'oculaire à l'image qu'il empêche de se former est sensiblement égale au foyer *f* de cet oculaire; d'après ce fait donné par l'expérience, on construit aisément la route des rayons convergents. Par le point P par exemple, menons la droite PB au centre optique; si des rayons parallèles GD

tombaient sur l'oculaire, ils seraient réfractés comme s'ils provenaient du point P, foyer de l'axe parallèle à leur direction (1520); réciproquement, puisque la marche de la lumière est la même en sens inverse, les rayons qui tendent à concourir en P doivent diverger parallèlement à B P. A la rigueur, la distance de l'oculaire à cette image est toujours un peu plus grande que le foyer f, parce que les rayons dans chaque faisceau doivent avoir un certain degré de divergence. Et comme la divergence qui convient à chaque vue est variable, chacun rapproche les verres plus ou moins. Pour les objets proches il est nécessaire d'allonger la lunette, parce que l'objectif tend alors à former l'image plus loin.

Les angles sous lesquels on voit les demi-diamètres de l'image et de l'objet sont égaux l'un à C B P, l'autre à C A P; la mesure du grossissement est donc $\frac{CBP}{CAP}$, rapport qui se réduit à $\frac{F}{f}$ quand on remplace les angles supposés très petits par leurs tangentes $\frac{CP}{f}$ et $\frac{CP}{F}$. Ainsi, quand les verres ont les mêmes foyers, la lorgnette grossit autant que la lunette astronomique; elle est cependant plus courte, puisque sa longueur n'est que $F-f$. Le grossissement est ordinairement de 2 ou 3 fois; il ne dépasse jamais 8 ou 10 fois, car alors il faudrait donner une grande longueur à la lunette, ce qui réduirait le champ presque à rien. Pour concevoir cette influence de la longueur sur le champ, observons que les faisceaux de rayons provenant de chaque point de l'objet ne convergent pas ici en sortant de l'oculaire, comme cela a lieu pour la lunette astronomique; au contraire ils divergent, de sorte que l'œil ne peut pas recevoir ceux qui ont trop d'écartement. Il en reçoit le plus possible quand il est tout contre le verre; or, dans ce cas, la mesure du champ est évidemment l'angle soutendu par la pupille vue du centre de l'objectif; de sorte qu'en désignant par p son diamètre et par l la longueur de la lunette, on a :

$$\text{tg } \tfrac{1}{2} \text{ champ} = \frac{p}{2l}.$$

Comme p est très petit, on voit que le champ se réduit à

très peu de chose dès que l est un peu grand. Par exemple, pour une longueur d'un pied, le champ ne serait pas seulement d'un degré, même en supposant à la pupille 2 lignes de diamètre; aussi ne donne-t-on généralement que 4 ou 5 pouces aux lorgnettes. Il est à noter que le champ ne dépend point de la largeur des verres; les grands objectifs n'ont pas d'autre avantage que de donner beaucoup de lumière, et la largeur de l'oculaire permet seulement de déplacer l'œil sans perdre l'objet de vue. La clarté, du reste, se mesure ici comme dans les autres lunettes (1564); il est facile de voir qu'en supposant même deux lignes de largeur à la pupille, il est inutile de donner à l'objectif plus d'un pouce d'ouverture pour un grossissement de 6 fois. Ainsi les énormes objectifs de quelques lorgnettes ne sont qu'une affaire de luxe. Mais en faisant arriver une image dans chaque œil, on augmente considérablement la clarté, et c'est là le grand avantage des *lorgnettes jumelles*.

Invention des lunettes et des télescopes.

1574. On a commencé à se servir des lunettes simples ou bésicles un peu avant l'année 1300. On en attribue généralement l'invention au frère Bacon, qui est mort en 1292; mais cela n'est pas bien démontré. C'est vers 1590 que la lorgnette a été imaginée; le nom de l'inventeur est incertain; on sait seulement que c'était un ouvrier en verres pour bésicles, qui travaillait à Middelbourg en Zélande; aussi les premiers instruments de ce genre ont-ils été connus sous le nom de *télescopes hollandais*. Cette invention avait été l'effet du hasard; mais Galilée, guidé par la théorie, la perfectionna si bien qu'il put découvrir les montagnes de la lune, les taches du soleil, les phases de Vénus, les satellites de Jupiter. L'instrument prit alors le nom de *lunette de Galilée*.

Kepler, dans sa *Dioptrique*, imprimée en 1611, fit connaître la *lunette astronomique* où l'oculaire convexe remplace avec tant d'avantage l'oculaire concave de la lunette de Galilée. C'est à Huygens qu'on doit les meilleures proportions des verres et la véritable théorie de cet instrument avec lequel il découvrit l'anneau de Saturne et son 4e satellite. La transformation de la lunette astronomique en lunette terrestre est attribuée à Campani, artiste habile qui travaillait à Rome pour Cassini, vers 1650; on lui doit aussi l'o-

culaire intermédiaire. Gregory d'Aberdeen a décrit son télescope de réflexion dans son *Optica promota*, imprimée en 1663; mais il ne paraît pas l'avoir exécuté. Cependant Newton a exécuté le sien vers 1668. C'est seulement vers 1719 que les télescopes de réflexion ont commencé à se répandre après les perfectionnements apportés dans leur construction par Halley.

1575. Pour terminer l'étude des lunettes, nous examinerons encore deux instruments qui, par des combinaisons de lentilles, donnent l'angle, et par suite la distance ou la grandeur des objets éloignés. Imaginons que l'objectif d'une lunette soit coupé en deux, suivant un de ses diamètres; nous savons que chaque moitié donnerait à elle seule une image complète (1531), de sorte que si on regarde le disque du soleil, par exemple, on peut concevoir qu'il y ait deux disques superposés. Quand on fera glisser les deux moitiés cc' de l'objectif l'une sur l'autre, les deux disques ne se recouvriront plus; on arrivera ainsi à mettre leurs bords précisément en contact. Supposons qu'il ait fallu pour cela 32 tours de la vis qui fait marcher la moitié mobile de l'objectif, et qu'on sache que le diamètre du soleil est de 32′ le jour de l'observation; on conclura qu'un tour du micromètre répond à un angle d'une minute, et on aura ainsi un moyen de mesurer les petits angles comme les diamètres des astres, la distance de leurs taches, celle de deux étoiles voisines, etc.

Micromètre objectif ou héliomètre.

Fig. 424.

1576. Dans la lunette micrométrique d'Amici (fig. 425), l'objectif est entier, mais sur le trajet des rayons se trouve une demi lentille concave E (fig. 426) d'un très long foyer, qui a été taillée dans une grande lentille F G H B sur laquelle on a pris aussi la bande A B L M, qui glisse à volonté sur la demi-lentille dans le châssis T, à l'aide de l'engrenage R. Cette bande peut être considérée comme un prisme d'un angle variable, mais toujours très petit, qui détourne les rayons venant de l'une des moitiés de l'objectif, et donne lieu ainsi à une seconde image plus ou moins séparée de la première. L'instrument se règle sur le soleil, comme nous l'avons dit tout à l'heure; mais on s'en sert surtout pour les objets terrestres. Pour mesurer, par exemple, l'angle que soutend un arbre vu de très loin, on superpose exactement

Lunette micrométrique d'Amici.

Fig. 425 et 426.

les deux images, puis on les sépare jusqu'à ce qu'elles ne fassent plus que se toucher; l'angle est alors donné par le déplacement de la bande. Dans les instruments que fait Ch. Chevalier, un déplacement d'une ligne répond à un angle d'une minute, mais, au moyen du vernier, on peut évaluer 3″.

Connaissant ainsi l'angle a soutendu par un objet, on peut calculer sa distance D de sa grandeur d; car a étant très petit, on a $\operatorname{tg} a = \frac{d}{D}$, équation qui donne la distance si on connaît le diamètre, ou le diamètre si on connaît la distance. Et même si on fait deux observations à des distances différentes, on aura :

$$\operatorname{tg} a = \frac{d}{D} \text{ et } \operatorname{tg} a' = \frac{d}{D'}; \text{ d'où } D = \frac{(D - D')\operatorname{tg} a'}{\operatorname{tg} a' - \operatorname{tg} a}.$$

Ainsi, pour avoir la distance, il suffit de mesurer $D - D'$, c'est-à-dire la quantité dont on s'est rapproché de l'objet. La valeur des divisions ayant été réglée sur un objet infiniment éloigné, il y a une petite erreur sur la mesure de l'angle quand il s'agit des objets proches. Quoique cette erreur soit en général négligeable, voici cependant comment on la corrige. Dans l'instrument, l'oculaire reste fixe (du moins pour chaque observateur); il faut donc que l'image se fasse toujours au même point. Pour cela, on éloigne à
Fig. 425. volonté l'objectif, et une ligne divisée Q mesure son déplacement. S'il est de 5 divisions, par exemple, on doit retrancher 5 millièmes de l'angle observé. On s'expliquera sans peine ce procédé de correction à l'aide de la formule relative à l'instrument que nous laissons à établir comme problème. Cette formule est $\operatorname{tg} a = \frac{D\,m}{F\,(f + \delta)}$; a est l'angle soutendu par l'objet; D la distance invariable de la lentille concave à l'image; m le déplacement de la bande; F le foyer de la lentille concave; f le foyer de la lunette pour les rayons parallèles, et enfin δ le déplacement de l'objectif suivant la distance de l'objet.

CHAPITRE IV.

DE L'OEIL ET DE LA VISION.

---

§ I. *Formation des images dans l'œil.*

1577. La manière dont les objets se peignent dans l'œil offre une application remarquable des lois de l'optique et en particulier de celles de la réfraction. On sait que l'œil proprement dit est un globe logé dans l'orbite et protégé par les paupières. Son diamètre, chez l'homme, est de 24 millimètres environ (un peu moins d'un pouce). En avant il présente une portion *c* plus convexe que le reste, formée par une membrane épaisse d'une transparence parfaite qu'on appelle la *cornée*. Une membrane SSSS fort épaisse aussi, mais blanche et opaque, appelée *sclérotique*, complète avec la cornée une sphère dont la cavité est divisée en deux parties très inégales par un diaphragme D qui répond à la jonction de la cornée avec la sclérotique. Ce diaphragme, appelé *iris*, à cause de la variété de ses couleurs, se voit à travers la cornée. Il est percé à son centre d'un trou qui est *la pupille* ou la prunelle. L'espace compris entre la cornée et l'iris se nomme chambre antérieure de l'œil; cet espace est rempli par l'*humeur aqueuse*, liquide très peu différent de l'eau. Derrière l'iris se trouve la cavité postérieure que remplit une masse transparente V, ressemblant à du verre fondu, et qu'on appelle le *corps vitré*. Dans sa partie antérieure, précisément derrière la pupille, se trouve enchâssé le cristallin *c*, espèce de lentille fort épaisse autour de laquelle rayonnent les procès ciliaires E. Sur tout le corps vitré s'étend une membrane *rrr* d'un blanc grisâtre qui est la rétine; elle résulte de l'épanouissement du nerf optique O, dont l'insertion, comme on doit le remarquer, n'a pas lieu précisément vis-à-vis la pupille. Entre la rétine et la sclérotique se trouve la *choroïde*, membrane formée

Description sommaire de l'œil. Fig. 427.

presque entièrement de vaisseaux; elle est revêtue d'un *pigmentum* noir sur la face qui répond à la rétine. Les procès ciliaires sont des plis très épais que forme la choroïde en avant.

1578. *Dimension moyenne des différentes parties de l'œil.*

	Millimètres.
Longueur de l'axe de l'œil	22 à 24
Rayon de courbure de la sclérotique	10 à 11
Rayon de courbure de la cornée	7 à 8
Épaisseur de la cornée	1 à 2
Diamètre de l'iris	11 à 12
Diamètre de la pupille	3 à 7
Distance de la cornée à la pupille	2
Rayon antérieur du cristallin	7 à 8
Rayon postérieur du cristallin	5 à 6
Diamètre du cristallin	10
Épaisseur du cristallin	5

1579. *Indice de réfraction des parties transparentes.*

Humeur aqueuse	1,337
Couche extérieure du cristallin	1,377
Sa partie moyenne	1,379
Sa partie centrale	1,399
Corps vitré	1,339

Analogie de l'œil avec la chambre noire.

1580. Si on enlève une partie de la sclérotique et de la choroïde vers le fond de l'œil, on observe sur la rétine, comme sur un verre dépoli, une image renversée des objets placés en avant. Il y a une grande analogie, comme on voit, avec la chambre noire; la partie transparente de l'œil remplace la lentille, la rétine remplace le tableau. On peut d'ailleurs faire une chambre noire dont la construction soit tout-à-fait calquée sur celle de l'œil. Sur un ballon de verre on enlève un segment qu'on remplace par un disque de cuivre percé d'un trou pour représenter l'iris et la pupille; on recouvre l'ouverture qu'on a faite au ballon par un verre de montre d'une convexité un peu forte, qui figure la cornée. On applique un enduit opaque sur le ballon, excepté en ar-

Œil artificiel.

rière. Alors, si on le remplit d'eau et si on le tourne vers une fenêtre ou vers une bougie placée à quelque distance, on peut recueillir en arrière sur un verre dépoli une image renversée très nette. Cette image est hors du ballon; mais si on met une lentille d'un foyer convenable derrière l'iris pour représenter le cristallin, on a une peinture très distincte sur le fond du ballon qui doit être dépoli ou couvert d'un papier demi-transparent.

1581. Signalons rapidement les principaux avantages de la construction de l'œil. D'abord on voit que la cornée, à cause de sa forte courbure, remplit les fonctions d'un verre périscopique; elle reçoit perpendiculairement les rayons des objets placés dans un angle de plus de 90°. Observons du reste que sans l'humeur aqueuse elle ne ferait pas converger les rayons; elle les ferait plutôt diverger; car par elle-même ce n'est qu'un ménisque divergent comme un verre de montre. Fonctions des différentes parties de l'œil.

On sait que la pupille s'élargit quand les objets sont peu éclairés, et se rétrécit au grand jour; c'est un moyen de compenser la faiblesse de la lumière ou de modérer son intensité. Quand on la modère en rapprochant les paupières, on diminue beaucoup le champ de la vision; le rétrécissement de la pupille n'a pas cet inconvénient à cause de la position de l'iris dans l'intérieur de l'œil. Un autre avantage de ce rétrécissement, c'est de faire voir plus nettement les objets rapprochés (1584).

A cause de la moindre réfringence des bords du cristallin, les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité se trouvent, en partie du moins, corrigées. Les courbures de cette lentille doivent être très fortes, parce que les milieux qui l'entourent n'ont pas des indices bien différents du sien. Un avantage de cette faible différence dans les indices, c'est qu'il y a très peu de lumière perdue par la réflexion. L'accroissement graduel de réfringence des couches profondes fait que le rayon se dévie peu à peu et non point d'une manière brusque. Comme le corps vitré est un peu plus réfringent que l'humeur aqueuse, la déviation serait plus faible à la sortie qu'à l'entrée si la face postérieure du cristallin n'était pas plus courbe que l'antérieure.

La rétine a pour fonction de recevoir l'impression de la

lumière; cela résulte évidemment de sa disposition et surtout de son origine nerveuse. Nous remarquerons que sa partie centrale est libre, l'insertion du nerf optique se faisant au-dessous et en dedans de l'axe de l'œil; cette disposition est importante puisque la partie de la rétine qui répond à l'entrée du nerf est insensible à la lumière (1605). Le pigment noir de la choroïde paraît destiné à détruire les rayons qui ont traversé la rétine; car chez les *Albinos* où il manque, la lumière, pour peu qu'elle soit vive, produit une impression douloureuse.

Marche de la lumière dans l'œil. Fig. 428.

1582. Il est aisé maintenant de se faire une idée de la marche de la lumière dans l'œil. Les rayons qui du point A, par exemple, viennent à la cornée, sont réfractés en pénétrant dans l'œil; de divergents qu'ils étaient ils deviennent convergents; leur convergence augmente en traversant le cristallin, de sorte qu'ils vont aboutir à un point *a* de la rétine, où ils forment une peinture du point A. L'iris, comme un diaphragme, ne laisse passer que la partie centrale du faisceau lumineux; il arrête les rayons extérieurs qui sont particulièrement affectés par les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité.

Nous avons supposé le point lumineux sur l'*axe optique*, c'est-à-dire sur la droite A *a* par rapport à laquelle l'œil est symétrique; s'il est hors de cet axe, il faut mener l'axe oblique B C par le point donné et par le *centre optique* C; l'intersection de cet axe avec la rétine donne le lieu *b* de l'image. Ce centre optique (1518) est le centre de courbure de la cornée; il est dans le cristallin à 2 millimètres environ de sa face postérieure. La construction que nous venons d'indiquer se conçoit d'après ce que nous avons vu sur les lentilles (1539); seulement ici, à cause de la coïncidence du centre optique avec le centre de courbure de la cornée et la faible différence des indices de réfraction des milieux traversés, l'obliquité peut aller à un très grand nombre de degrés, sans que l'image cesse d'être nette.

Renversement de l'image. Sa grandeur.

1583. Il est évident, par la construction précédente, que l'image est renversée, ce qui ne nous empêche pas de voir les objets droits (1596). Il est évident aussi que sa grandeur est à celle de l'objet dans le même rapport que les distances au centre optique. Ainsi elle est contenue dans la

grandeur de l'objet autant que la distance de celui-ci contient de fois 14 millimètres. Il résulte de là que, pour une même ouverture de la pupille, la clarté de l'image ne change pas, quelle que soit la distance de l'objet; c'est-à-dire qu'une bougie, par exemple, n'est pas plus brillante à un mètre qu'à 10 mètres. En effet, si dans le second cas l'œil reçoit 100 fois moins de lumière (1405), en revanche l'image sur le fond de l'œil a une surface 100 fois plus petite; la clarté, qui a pour mesure la quantité de lumière reçue par l'unité de surface, reste donc la même. Cependant, quand les objets sont très éloignés, le défaut de transparence de l'air diminue notablement la clarté. Sa clarté.

1584. On sait qu'une chambre noire ne peut pas donner à la fois une image distincte des objets éloignés et des objets proches. D'après cela, comment concevoir que l'œil puisse nous faire voir nettement à quelques pouces et à plusieurs lieues? Cela s'explique par diverses causes: 1° il n'est pas nécessaire que la concentration de chaque faisceau de rayons se fasse en un point mathématique pour que l'image soit sensiblement nette; 2° plus une chambre noire est petite, et plus est grande l'étendue dans laquelle on peut déplacer l'objet sans que l'image cesse d'être nette; ainsi une lentille d'un pouce de foyer donne une image sensiblement aussi nette des objets placés à un demi-mètre et des objets placés à une distance plus grande, quelle qu'elle soit; 3° la pupille se rétrécit quand on regarde de très près; alors le faisceau qui doit peindre chaque point étant fort étroit, son intersection avec la rétine se réduit presque à un point. Pour s'assurer de l'influence de ce rétrécissement, on n'a qu'à regarder à travers un trou d'épingle; on voit alors aussi distinctement à 4 ou 5 pouces qu'à une distance quelconque, seulement la lumière est affaiblie; 4° enfin, l'œil peut se modifier de manière à faire converger en un point de la rétine des rayons qui, pour son état ordinaire, auraient trop de divergence. Qu'on regarde un point P à travers deux trous d'épingle oo', dont l'écartement soit moindre que le diamètre de la pupille; à 5 ou 6 pouces, par exemple, les rayons seront trop divergents pour que la réfraction les fasse concourir en un seul point de la rétine, de sorte qu'on voit alors deux points. Mais, par

Vision à différentes distances.

Fig. 429.

un certain effort, on parvient à faire coïncider les deux images, du moins quand le point P n'est pas trop près. On a beaucoup disputé sur la modification que l'œil éprouve dans ce cas; mais ce qu'il y a de plus probable, c'est que la choroïde, et particulièrement les procès ciliaires, qui sont presque entièrement composés de vaisseaux, ont la propriété de se tuméfier par le sang, comme beaucoup d'autres organes, ce qui produit une plus grande plénitude de l'œil et surtout une pression autour du cristallin, lequel alors s'avance un peu et devient plus convexe; les couches extérieures, étant presque fluides, permettent aisément ce changement de forme. On peut produire une modification analogue sur l'œil en exerçant une légère pression avec les bords d'un tube d'un diamètre convenable, et on parvient ainsi à voir distinctement les objets placés très près.

Étendue de la vue distincte.

1585. On appelle *optomètres* ou *opsiomètres* les instruments destinés à mesurer l'étendue de la vue distincte. On en fait un très simple avec une règle d'un mètre environ couverte d'un velours noir sur lequel on tend un fil de soie blanche. La règle étant très près de l'œil, si on regarde dans la direction de la longueur, on voit la partie voisine du fil sous la forme d'un angle très aigu dont le sommet se trouve à une certaine distance qui est la première limite de la vision distincte. La portion qui suit ce point paraît nette et d'un blanc mat; sur une certaine longueur ensuite elle reparaît sous la forme d'un angle opposé au premier, dont le sommet détermine la seconde limite de la vision distincte et l'intervalle entre ces deux points est ce qu'on appelle le champ de la vision distincte. Un appareil convenable fixe la position de l'œil et donne le moyen de mesurer les distances. D'après les expériences de M. Lehot, on peut admettre 30 centimètres pour la distance moyenne de la vue distincte; le champ comprend quelques centimètres en-deçà et au-delà. Mais il y a de grandes différences, suivant les individus; généralement même les limites sont différentes pour les deux yeux. Nous remarquerons que les verres de convergence rétrécissent le champ, et que les verres de divergence l'agrandissent.

Il est d'ailleurs important de noter que la distance de la vue distincte dépend des dimensions de l'objet, on lit très

bien un gros caractère à la distance où un petit devient illisible; les maisons, les arbres, se voient très distinctement, de très loin; seulement les détails échappent. En définitive, l'image nous paraît nette quand ses dimensions surpassent de beaucoup la largeur de l'auréole diffuse que produit autour d'elle le défaut de concentration des rayons.

1586. A mesure qu'on avance en âge, l'œil perd de sa plénitude, et généralement les vieillards ne peuvent plus voir nettement les objets proches. Pour lire, par exemple, ils sont obligés d'éloigner beaucoup les caractères dont l'image devient alors trop petite. Ce défaut de l'œil porte le nom de *presbytisme*; on l'observe quelquefois dans la jeunesse par défaut de conformation. On y remédie avec les *lunettes convergentes* qui permettent de placer l'objet à la distance ordinaire, et le font voir de la grandeur qu'il aurait naturellement à cette distance. Cela est évident par la fig. 413; les rayons partis du point A sont réfractés de manière à n'avoir pas plus de divergence que s'ils partaient d'un point plus éloigné A', et pour un œil placé derrière la lentille, l'angle soutendu par l'image A' B' est même un peu plus grand que l'angle soutendu par l'objet A B, vu du même point, sans verre. Le choix des verres convenables à chaque vue est une affaire de tâtonnement; cependant on peut se guider par la théorie. Supposons que la distance de la vue distincte soit de 24 pouces et qu'on veuille lire à 8 pouces, on aura (1534) :

Presbytisme.

Lunettes pour les presbytes.

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{8}-\frac{1}{24} \text{ ou } F=12 \text{ pouces.}$$

Et comme les numéros des verres indiquent les foyers en pouces, on prendra des verres du nº 12.

1587. On appelle *myopes* ceux qui sont obligés de tenir les objets tout près de l'œil pour les voir distinctement. Pour eux les objets éloignés ne donnent que des images confuses, parce que les rayons provenant de chaque point sont rassemblés avant de rencontrer la rétine. Les causes ordinaires du myopisme sont une trop grande convexité de la cornée ou du cristallin; c'est un défaut très commun chez les jeunes gens et qui diminue avec l'âge. Les lunettes pour les

Myopisme.

Lunettes pour les myopes. myopes ont des verres concaves qui augmentent la divergence des rayons. La fig. 414 montre comment les rayons partis du point A placé assez loin prennent par la réfraction la même divergence que s'ils provenaient d'un point A' placé très près. Et si l'œil est tout contre le verre, l'angle soutendu par l'image A' B' est presque aussi grand que l'angle soutendu par l'objet A B vu à l'œil nu. Le numéro des lunettes se calcule aisément : si on ne voit bien qu'à 4 pouces et qu'on veuille voir à 8, on aura (1537) :

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \text{ d'où } F = 8$$

Pour les objets éloignés il faudrait des verres d'un numéro *plus fort*, c'est-à-dire d'un foyer plus court ; souvent même les myopes n'ont besoin de lunettes que pour les objets éloignés.

Phénomènes produits par la vision indistincte. 1588. La vision indistincte donne lieu à plusieurs phénomènes remarquables. Ainsi un point, à moins qu'il ne soit très brillant, disparaît quand il est trop près ou trop loin de l'œil, parce que, dans les deux cas, son image sur la rétine se réduit à un petit cercle de lumière diffuse. Une ligne ne disparaît pas à la même distance, parce que les images diffuses de chacun de ses points se renforcent en se superposant. Les effets de la vision indistincte sont surtout remarquables pour les astres dont les rayons sensiblement parallèles pour chaque point se trouvent concentrés avant d'arriver à la rétine, non seulement dans les yeux myopes, mais dans tous les yeux qui ne sont pas fortement presbytes. Il en résulte que les étoiles paraissent élargies ; si elles sont très voisines, elles se confondent, les diamètres des planètes sont agrandis ; Vénus en croissant paraît ronde ; il en est de même de Saturne malgré son anneau. Une étoile très voisine de la lune paraît en dedans du limbe, au moment où elle est couverte par l'auréole qui élargit le disque. La même apparence peut avoir lieu avec un télescope, s'il ne donne pas une image parfaitement nette.

Rayons partant des lumières. Fig. 431, 2. 1589. Nous terminerons ce qui regarde la marche de la lumière dans l'œil en donnant l'explication de deux illusions assez remarquables. On sait que quand on regarde

une bougie en clignant les yeux, on voit des traits de lumière s'élancer à de grandes distances, et toujours perpendiculairement aux bords des paupières. Cela est dû à ce que le liquide qui lubrifie la cornée forme dans le sillon des paupières une espèce de lentille cylindrique concave, qui disperse les rayons perpendiculairement en haut et en bas. Le phénomène est plus marqué lorsqu'il y a des larmes ou qu'on instille un peu d'eau. Si on met un écran E vers le haut, ou si on relève la paupière supérieure, les traits supérieurs $b\,b'$ subsistent seuls (1594-95), ce qui prouve bien que le phénomène n'est pas dû à la réflexion. Il n'est pas dû non plus à la diffraction, car on ne l'observe plus avec le bord d'un corps opaque; au contraire, en regardant à travers la couche capillaire qui s'élève le long de la paroi d'un verre, on reproduit l'effet de la paupière inférieure. Pour de grandes obliquités, il se manifeste de la coloration.

Raies obscures dans les fentes étroites.

1590. Quand on regarde de près à travers une fente très étroite ou bien entre les dents d'un peigne fin, on voit un grand nombre de raies obscures très fines parallèles à la fente. M. Péclet a montré que chaque raie était l'ombre d'un petit point opaque appartenant à l'œil. Cette ombre projetée sur la rétine est linéaire à cause de la forme du corps éclairant. Les raies se réduisent à des points quand la fente n'est plus qu'un trou. On produit le phénomène en mettant entre l'œil et la fente un verre marqué d'un très petit point d'encre. Nous verrons par la suite que ces lignes ne peuvent pas être confondues avec celles que produit la diffraction.

De l'œil et de la vision chez les animaux.

1591. Après avoir étudié la vision chez l'homme, nous indiquerons quelques particularités remarquables de l'œil des animaux. Chez les mammifères, la pupille, au lieu d'être ronde, est souvent en forme de fente, tantôt verticale comme chez les chats, tantôt transversale comme chez les ruminants. Il est évident que la forme de l'ouverture n'a pas d'influence sur la forme de l'image (1531, 1554). Sur une partie de la choroïde, dans un très grand nombre d'espèces, on trouve, au lieu du pigmentum, une membrane chargée de couleurs nacrées, qu'on appelle le *tapis*. Le tapis est jaune orangé dans le chat, blanc dans le chien, bleu dans le bœuf, violacé dans le cheval, etc. On peut le consi-

dérer comme un appareil de renforcement, car il donne encore de la lumière à la rétine. Ses couleurs sont visibles pendant la vie quand le fond de l'œil est suffisamment éclairé. Chez les carnassiers, qui ont une vue très parfaite, comme le chat, le tigre, etc., les procès ciliaires sont très grands, et la choroïde devient un véritable tissu caverneux dont l'épaisseur varie beaucoup, suivant la quantité de sang qu'elle contient.

Chez les oiseaux, les procès ciliaires sont aussi très développés, et la choroïde offre un prolongement connu sous le nom de peigne, qu'on peut assimiler à un grand procès ciliaire. Dans la chouette, le cristallin est presque sphérique; mais en général chez les oiseaux il est très peu convexe, et par cela même sa courbure peut facilement augmenter. Quant à la cornée, sa convexité est très forte : autour d'elle on trouve des plaques osseuses qui forment un cercle complet dans l'aigle et quelques autres oiseaux. Le globe de l'œil est très aplati en arrière; mais la partie postérieure de la sclérotique est mince et dépressible, de sorte que, suivant la plénitude de l'organe, le fond peut être plus ou moins éloigné du cristallin. Il est à noter que la rétine présente beaucoup de plis. En résumé, l'œil des oiseaux paraît fait surtout pour voir de loin, mais il possède de nombreux moyens de s'adapter aux petites distances.

Dans les poissons, la cornée est presque plane; sa convexité aurait été peu utile, puisque l'humeur aqueuse a presque le même indice de réfraction que l'eau. En revanche, le cristallin est sphérique, et comme dès lors sa courbure ne peut pas beaucoup augmenter, les procès ciliaires sont peu marqués. On trouve dans la choroïde un plexus veineux qui occupe un tiers de la cavité de l'œil; c'est ce qu'on a appelé la glande choroïde. Le corps vitré est très petit. Il existe une espèce de tapis d'un blanc argenté. Chez quelques poissons, notamment dans la dorade, il y a un petit muscle qui tire le cristallin en avant.

§ II. *Perception des images.*

La formation des images sur la ré- 1592. Les images dont nous venons d'étudier la formation ne sont pas une circonstance accidentelle du phénomène

de la vision, elles en sont au contraire une condition essentielle. Cela est évident quand on considère que la vision est nette quand l'image est nette, confuse quand l'image est confuse, et que d'ailleurs la structure nerveuse et la disposition de la rétine ne permettent pas de lui assigner d'autre fonction que de percevoir l'impression produite par la lumière.

tine est une condition essentielle de la vision.

1593. Maintenant reste à examiner comment se fait la perception des images ou la vision proprement dite. Cette étude à la rigueur appartient à la physiologie et à la métaphysique; mais elle touche de si près à la physique, que nous ne pouvons nous dispenser de passer en revue les principaux faits qui s'y rattachent.

Perception des images.

1594. Un premier fait remarquable, c'est que nous voyons les objets hors de nous, quoique leur image soit sur la rétine. Il en est ici comme pour le son; l'expérience nous apprend que la cause de l'impression est hors de nous. Il en résulte que peu à peu l'impression et l'idée d'extériorité deviennent inséparables. L'habitude est tellement prise que ces fausses lueurs qu'on produit, les yeux fermés, par une légère pression sur l'œil, nous paraissent toujours en dehors. Mais ce n'est qu'un effet de l'habitude, car au commencement on rapporte l'impression de la lumière à la rétine même. Les aveugles-nés auxquels on donne la vue à un âge où ils peuvent rendre compte de leurs sensations, disent d'abord que les objets leur *touchent* les yeux, puis peu à peu ils acquièrent le sentiment de la distance. Ce fait a été parfaitement établi par les observations de Cheselden.

Comment nous voyons les objets hors de nous.

1595. Si donc nous avons l'impression de la lumière sur un point de la rétine, aussitôt un point lumineux nous apparaît au dehors, et *il nous apparaît sur la direction qui va du point frappé au centre optique*, parce que l'expérience nous apprend que c'est sur cette direction qu'un point lumineux doit être placé pour produire l'impression que nous éprouvons. Le jugement instinctif que nous portons alors devient inséparable de la sensation; aussi la lueur que détermine une légère pression sur l'œil nous paraît toujours au dehors sur la direction d'où la lumière aurait dû venir pour produire un effet pareil. Dans l'expérience n° 1584, fig. 429, les rayons arrivant en p et p' nous font voir 2 points hors de l'œil, l'un sur la direction pC, l'autre sur la direc-

Direction dans laquelle nous voyons.

tion $p'C$. Si on arrête le rayon $P\rho$, l'image qui est dans la direction pC doit disparaître. En effet l'image *inférieure* disparaît quand on bouche le trou *supérieur* de la carte, et réciproquement. De même quand on met à 2 ou 3 pouces devant l'œil une carte percée d'un petit trou, les rayons ne pouvant pas être concentrés forment une tache circulaire assez large sur la rétine. Qu'on fasse alors passer une épingle entre l'œil et la carte, elle paraîtra venir d'en haut quand elle viendra d'en bas. Ces expériences prouvent que nous ne sentons nullement la direction suivant laquelle les rayons frappent la rétine, et que, pour assigner la position du point lumineux, nous suivons invariablement la règle énoncée plus haut.

Expérience de l'épingle renversée.

Comment nous voyons les objets droits.

1596. Cette règle admise, il suit nécessairement que nous devons voir les objets droits quoique leur image sur la rétine soit renversée. Du reste nous n'arrivons à reconnaître ainsi la position des objets qu'à la longue et par une véritable éducation, car les aveugles-nés auxquels on donne la vue sont incapables de dire d'abord si les objets sont droits ou renversés. Il semble qu'au commencement l'impression sur la rétine soit comme la peinture dans ces chambres noires où le tableau est horizontal. L'inspection seule de ce tableau ne dit rien sur la position des objets extérieurs, il faut d'autres renseignements qui, pour ce cas, sont ce qu'est le toucher pour le sens encore imparfait de la vue. Peu à peu nous nous faisons des règles, et nous arrivons à assigner immédiatement la position de l'objet d'après celle de l'image. Ces règles, il est vrai, nous trompent quelquefois comme nous l'avons vu tout à l'heure (1592), mais elles sont justes dans la plupart des cas.

Comment nous ne les voyons pas doubles.

1597. Quoiqu'il y ait une image dans chaque œil, l'objet cependant nous paraît simple, de même que nous n'entendons qu'un son avec les deux oreilles (821). A aucune époque nous ne voyons les objets doubles. L'aveugle sur lequel Cheselden a fait ses observations, n'avait d'abord été opéré que d'un œil; quand on lui rendit l'autre, il continua à voir les objets simples, seulement ils lui parurent plus grands. Ainsi les choses se passent *comme si les deux rétines étaient superposées;* un objet paraît simple quand les images tombent sur un des *points de superposition;* autrement il paraît

double; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on louche volontairement, ou quand on dérange un œil avec le doigt. A l'origine, les points qui donnent une sensation unique sont arbitraires, du moins dans de certaines limites; c'est l'usage qui les détermine, et l'usage peut aussi les changer; car, si par accident un œil ne peut plus se tourner comme l'autre, les objets qui d'abord paraissaient doubles finissent par paraître simples. Dans l'état normal, les points de sensation unique sont homologues, c'est-à-dire qu'ils se correspondraient si on superposait les rétines en faisant coïncider leurs centres, et sans qu'il y eût de rotation. Cas où l'on voit double.

1598. Le strabisme est dû à ce que les points de sensation unique ne sont pas homologues. Le *bon œil* alors regarde directement l'objet, et l'*œil louche* se tourne de manière à faire tomber l'image sur les points qui peuvent donner une sensation unique; d'où il suit que son axe n'est pas dirigé vers l'objet. Quand on se sert de l'œil louche isolément, il se dirige exactement, parce que l'image sur la partie centrale de la rétine est toujours plus nette. Les procédés pour corriger le strabisme consistent à faire tomber les images sur les parties centrales des rétines; à la longue on finit ainsi par y transporter les points de sensation unique. Au reste il est bien rare que ces points soient rigoureusement homologues; il y a presque toujours un léger degré de strabisme. Pour s'en assurer, on n'a qu'à regarder d'abord un objet avec les deux yeux; si ensuite on ferme le gauche, ordinairement il n'y a pas de déplacement; il n'y en a pas non plus au premier instant si on ferme le droit; mais l'image est moins bonne, et un léger déplacement se manifeste dès qu'on fait un effort pour voir plus distinctement. Cet effort consiste à diriger l'œil de manière que l'image tombe sur la partie centrale de la rétine. A ce moment on verrait double si on découvrait l'œil droit. Strabisme.

1599. Nous avons, comme on sait, la faculté d'apprécier les distances à l'inspection seule des objets. Cette faculté n'est pas innée, puisque les aveugles-nés, qui voient pour la première fois, croient que les objets touchent leurs yeux; elle s'acquiert par une longue étude des modifications que nous éprouvons en regardant l'objet à différentes distances. Chaque modification finit par se lier à l'idée de la distance Jugement des distances.

correspondante, et quand nous éprouvons l'une, l'autre s'éveille immédiatement.

Voici nos principaux moyens de juger les distances : 1° la peinture sur la rétine est plus ou moins grande suivant que l'objet est plus ou moins près, c'est là le moyen par excellence; 2° certains détails cessent d'être distincts pour une distance déterminée de l'objet; 3° pour les grandes distances, il y a des différences notables de clarté, à cause du plus ou moins de lumière absorbée par l'air; 4° l'angle que forment les axes des yeux en se dirigeant sur l'objet, change suivant que l'objet s'éloigne ou se rapproche; or nous avons la conscience de l'effort que nous faisons dans ce cas, du moins quand il s'agit de petites distances; 5° les objets intermédiaires nous fournissent d'utiles renseignements; ainsi nous jugeons bien mieux les distances dans une ville ou dans la campagne que sur la mer ou dans le ciel.

Jugement de la grandeur, de la forme, etc.

1600. Nous apprécions aussi d'après une simple inspection la grandeur, la forme, la disposition des objets; mais réellement dans tous ces cas, comme dans le cas des distances, le sens de la vue n'est pas le seul qui fournisse les éléments du jugement; nous faisons intervenir une foule de notions étrangères sans lesquelles nous serions hors d'état de prononcer. C'est ce que prouvent parfaitement les observations faites sur les aveugles-nés auxquels on rend la vue : leur jugement ne se forme qu'après des comparaisons répétées entre l'apparence et la réalité.

Illusions de perspective.

1601. Quand on songe à toutes les interprétations qui nous sont nécessaires pour tirer tant de notions d'une simple peinture sur la rétine, on n'est pas étonné que le sens de la vue nous induise si souvent en erreur. Il nous est impossible de nous défendre de l'illusion des panoramas, des dioramas. Nous voyons des saillies, des enfoncements manifestes dans les bas-reliefs en grisaille, et au contraire les globes de la lune et du soleil nous semblent des disques plats. Certains dessins défigurés paraissent très réguliers quand on les regarde d'un certain point de vue; les lignes trop longues sont alors vues en raccourci à cause de l'obliquité, et elles reprennent ainsi les proportions convenables.

Anamorphoses.

Portraits regardant le spectateur.

Une illusion de perspective encore assez curieuse est celle des portraits qui regardent toujours le spectateur. Cela tient

à ce que la surface étant plane, les proportions du dessin restent sensiblement les mêmes pour toutes les positions, du moins tant que la distance est un peu grande. De côté, on peut bien voir les yeux plus étroits, mais on ne les voit pas de trois quarts s'ils sont de face; les proportions de blanc restent les mêmes, et la pupille n'ayant pas marché vers un angle plus que vers l'autre, le spectateur doit croire qu'elle ne s'est pas détournée de lui.

Les illusions sont surtout faciles dans les espaces célestes où nous sommes tout-à-fait hors d'état d'apprécier les distances. Par exemple, on voit quelquefois des rayons de soleil s'échapper d'un nuage en divergeant; certainement il est bien impossible que cette grande divergence soit réelle, et en effet, les rayons sont parallèles; mais, de même que dans une longue allée, leur intervalle paraît d'autant plus petit que la distance est plus grande; et comme nous ne reconnaissons pas quelle est la partie la plus voisine de nous, les rayons, quoique très inclinés, peuvent fort bien nous paraître dans le plan vertical qui nous fait face. C'est à peu près comme pour une longue avenue, dont le terrain vu de loin semble beaucoup se relever. Rayons de soleil divergents.

1602. Dans les cas précédents, c'est réellement la sensation qui nous trompe; dans d'autres cas le raisonnement contribue à l'erreur. Ainsi nous croyons que la voûte céleste est surbaissée, parce que nous nous imaginons que la distance est plus grande quand nous voyons beaucoup d'objets intermédiaires. Et il est clair d'après ce faux principe que la surface du ciel doit nous paraître plus loin du côté de l'horizon qu'au-dessus de nos têtes. Beaucoup d'illusions sur la grandeur proviennent de ce que nous voulons toujours tenir compte des distances sur lesquelles il nous est, comme on sait, si facile de nous tromper. Quelquefois en voyant passer une mouche sur une vitre, nous la prenons pour un oiseau dans le ciel. La lune à l'horizon nous paraît énorme, parce qu'alors nous la croyons très loin. L'image dans l'œil restant à peu près la même malgré l'éloignement que nous croyons réel, il nous est impossible de ne pas admettre un agrandissement dans l'objet. Forme du ciel. Grandeur de la lune à l'horizon.

1603. On s'est assuré par le procédé des ombres (1409) qu'en général l'œil n'appréciait pas une différence de clarté Degré de sensibilité de la rétine.

de $\frac{1}{64}$. Ainsi, qu'on mette une bougie à 1 mètre du tableau, une autre à 8 mètres, l'ombre correspondante à cette dernière ne se distinguera pas sur le fond; mais on la verra si on agite le corps qui porte ombre; ce qui prouve que la sensibilité est plus grande quand il y a mouvement relatif.

Clarté avec un œil et avec les deux yeux. Fig. 431.

1604. Voici une expérience qui permet de comparer la lumière perçue par chaque œil et par les deux yeux. Devant un carré B de papier blanc, et à quelque distance on en tient un autre N plus petit de papier noir qui laisse voir aux deux yeux la partie B, à l'œil gauche la partie G, et au droit la partie D. La comparaison est alors facile; généralement on trouve que l'œil gauche est moins sensible. On peut même mesurer les différences par les distances où il faut mettre des bougies pour éclairer également les divers compartiments. Jurin, d'après des expériences de ce genre, a conclu qu'un objet vu avec les deux yeux était seulement de $\frac{1}{13}$ plus clair qu'avec un seul. Ce résultat n'est peut-être pas très exact, mais au moins il est certain que la clarté est bien loin d'être double.

Partie insensible de la rétine. Fig. 432.

1605. Mariotte a démontré que la partie de la rétine qui répond à l'entrée du nerf optique était insensible à la lumière. Sur un tableau noir vertical T T, on marque un point N à la hauteur de l'œil; à droite, à un pied de distance, et à la même hauteur, on attache un disque blanc M de 2 pouces de diamètre. Après avoir fermé l'œil gauche, on s'éloigne peu à peu en ne regardant que le point N, ce qui n'empêche pas de voir le disque M; mais quand on est à peu près à 4 pieds et demi, on ne le voit plus, parce que son image tombe alors sur la base B du nerf optique. Il est facile de modifier l'expérience pour l'œil gauche, et on peut varier les distances, pourvu que l'on conserve les rapports.

Discussion sur les fonctions de la rétine.

1606. Observant ainsi que la vision manque précisément où manque la choroïde, Mariotte avait supposé que cette dernière membrane était l'organe essentiel de la vision. La structure toute nerveuse de la rétine, dont on ne verrait plus dès lors l'usage, doit faire rejeter cette hypothèse; et on peut très bien admettre qu'à sa base le nerf optique n'a pas encore la structure propre à recevoir l'impression de la lumière. Sœmmering a signalé un trou d'une demi-ligne de diamètre à la partie centrale de la rétine, où cependant la

vision est la plus nette, ce qui fortifierait l'hypothèse de Mariotte; mais l'existence du trou central est contestée par un grand nombre d'anatomistes, notamment par M. de Blainville qui admet seulement un petit espace translucide.

Lahire, pour expliquer le défaut de vision à la base du nerf optique, supposait que la rétine, insensible aux rayons qui la traversaient, percevait par une sorte de toucher les modifications imprimées par la lumière au pigmentum ou au tapis, de sorte qu'en général le contact de la rétine avec une surface opaque frappée par la lumière était la condition essentielle de la sensation. Mais chez les Albinos, chez les lapins blancs, le pigmentum et le tapis ne sont pas opaques; si on dit d'après cela que l'opacité n'est pas nécessaire, alors on ne voit pas pourquoi la couche superficielle de la rétine à la base du nerf optique ne percevrait pas la lumière par son contact avec la couche profonde. M. Brewster cite d'après le docteur Knox une disposition anatomique qui fortifierait l'hypothèse de Lahire; c'est que dans la seiche (sepia loligo) il existe un enduit membraneux opaque entre la rétine et le corps vitré. D'un autre côté, d'après la description de M. Wallace, la rétine dans la seiche serait formée de deux lames entre lesquelles il existerait une partie de la choroïde. Il est évident que ce point d'anatomie n'est pas assez éclairci pour qu'on doive abandonner l'opinion généralement admise que la rétine est sensible à la lumière qui la traverse.

1607. La sensation de la lumière persiste un certain temps après que la cause a cessé; c'est ce que prouve bien l'expérience du ruban de feu produit par un charbon qu'on agite rapidement. D'Arcy a même mesuré ainsi la durée de la sensation; avec un appareil convenable il faisait tourner le charbon de plus vite en plus vite jusqu'à ce qu'il y eût un cercle lumineux entier; la durée de la sensation était alors égale au temps de la révolution. Mais ce procédé ne donne bien que le temps pendant lequel la sensation conserve la même intensité; on peut mesurer la durée entière avec un autre appareil imaginé par M. Aimé. Concevons deux disques sur le même axe, l'un fixe, percé d'ouvertures régulièrement espacées; l'autre mobile, présentant une seule ouver- **Durée de la sensation.**

ture qui, pendant la rotation, répond successivement à celles du premier disque. Quand la rotation est lente on ne voit qu'un jour; mais en augmentant graduellement la vitesse, on commence à en voir un second; il est clair qu'alors la sensation du premier dure jusqu'au moment où celle de l'autre commence; sa durée est égale au temps qui s'écoule entre la production des deux jours. Si, par exemple, le premier disque a 4 ouvertures et qu'il y ait 1 tour par seconde, la durée de la sensation sera $\frac{1}{4}$ de seconde. On peut varier l'expérience en augmentant la vitesse de manière à voir à la fois plus de deux jours.

Avec des appareils du genre de ceux que nous venons d'indiquer, M. Plateau a trouvé 1° que la durée totale des impressions sur la rétine était d'un tiers de seconde, terme moyen; 2° qu'il faut un temps très sensible pour que l'impression soit complète; 3° que le temps pendant lequel elle conserve la même intensité est environ $\frac{1}{10}$ de seconde, quand il s'agit d'un papier blanc éclairé par la lumière du jour; 4° que ce temps est plus long quand la lumière est plus faible; 5° que la durée totale de l'impression est d'autant plus grande que l'impression a été plus forte et moins prolongée, pourvu qu'elle ait eu le temps de devenir complète.

Instantanéité de l'éclair.

1608. Quand on fait tourner très vite un cercle divisé en secteurs alternativement noirs et blancs, on ne voit plus qu'une teinte grise uniforme, parce que les impressions dues aux secteurs blancs n'ont pas le temps de devenir complètes (1607, 2°). Cette teinte est uniforme sur tout le disque à la lumière du jour; mais on conçoit que les secteurs seront distincts si le cercle est éclairé pendant un instant assez court pour que le déplacement dû à la rotation soit insensible. Or c'est ce qui arrive avec l'éclair; quelque vitesse que l'on donne au cercle, il apparaît avec ses secteurs distincts, comme s'il était immobile. M. Wheatstone s'est assuré ainsi que la durée de l'éclair n'était pas d'un millième de seconde.

Appareils fondés sur la durée de la sensation.

1609. On a imaginé dans ces derniers temps plusieurs appareils ingénieux dont les effets sont fondés sur la persistance de l'impression lumineuse. Le *kaléidophone* se compose d'une tige d'acier fixée par un bout et portant à l'autre un petit miroir. On fait vibrer cette tige dans différents plans

Kaléidophone.

avec un archet pendant que le soleil tombe sur le miroir; le rayon réfléchi tracé alors sur le plafond des courbes extrêmement variées d'un fort joli aspect. On peut remplacer le miroir par une grosse perle étamée.

1610. Le *thaumatrope* est un carton portant des figures dont une moitié est d'un côté, et l'autre de l'autre. On le fait tourner rapidement entre les doigts par un axe qui est dans la surface, et on voit alors l'ensemble du dessin. **Thaumatrope.**

1611. Lorsqu'une roue dont les rais sont noirs tourne rapidement devant un fond blanc, on voit seulement un cercle d'une teinte grise uniforme; mais si une seconde roue toute pareille à la première tourne en sens inverse sur le même axe avec la même vitesse, on a la singulière apparence d'une roue immobile d'un nombre de rais double; ces rais ont une teinte grise sur un fond plus sombre. Pour concevoir ce phénomène, considérons séparément un rais sur chaque roue. En un tour les deux rais coïncident deux fois, et les lieux de coïncidence, qui sont les rayons d'un même diamètre, restent exactement fixes d'un tour à l'autre. Vis-à-vis les coïncidences le fond n'est caché qu'une fois à chaque tour; au contraire dans les intervalles il est caché deux fois, puisque chaque rayon y passe séparément. D'après cela les coïncidences doivent être plus claires que les intervalles, et comme elles sont fixes, elles doivent simuler les rayons d'une roue immobile. Si une des roues a n rayons, l'autre n'en ayant qu'un, il y aura évidemment $2n$ coïncidences en un tour, à cause du mouvement inverse; que maintenant la roue qui n'avait qu'un rayon en ait n, toutes les coïncidences étant simultanées, leur nombre restera $2n$, comme auparavant. Ainsi on peut se rendre compte de toutes les circonstances de l'apparence. **Roues de Faraday.**

Quand les vitesses ne sont pas les mêmes, la roue résultante peut tourner dans le sens de la plus grande vitesse, ou rester fixe, mais avec un plus grand nombre de rais. Lorsque les roues ne tournent pas sur le même axe, on obtient des figures variées fixes ou mobiles, dépendant toujours de ce fait, qu'il y a moins de lumière interceptée vis-à-vis les coïncidences qu'ailleurs.

1612. Pour étudier la constitution des veines liquides (425), M. Savart s'est servi d'un appareil analogue à celui que **Appareil pour l'exa-**

men des veines liquides. nous venons de décrire. C'était un ruban sans fin, tendu parallèlement à la veine qui tombait verticalement sous une charge constante. Ce ruban de couleur noire était traversé par des raies blanches horizontales. En le mettant en mouvement de bas en haut avec une vitesse convenable, à quelques décimètres derrière le jet, qui était formé par de l'eau très foncée en couleur, on voyait une image fixe qui, vis-à-vis la partie trouble de la veine, se composait de bandes noires bien séparées, dont la largeur invariable pour chacune croissait et décroissait périodiquement suivant sa distance à l'orifice; d'où M. Savart a conclu que cette partie trouble de la veine était formée de gouttes désunies et soumises à des changements de forme périodiques.

Phénakisticope. 1613. Le *phénakisticope*, imaginé par M. Plateau, se compose de deux disques de carton qui tournent ensemble comme des roues sur un même axe. A travers les trous que porte un des disques vers sa circonférence, on regarde des figures tracées sur l'autre. Ces figures représentent, par exemple, les différentes positions d'un homme frappant avec un marteau; il y a une position devant chaque trou; or pendant la rotation il semble que ce soit le même homme qui prenne successivement toutes ces positions, et qui frappe à coups redoublés. Pour concevoir cette apparence il faut remarquer que chaque figure est vue pendant un instant trop court pour qu'on s'aperçoive de sa rotation. Son image subsiste pendant qu'un intervalle noir passe devant l'œil; puis immédiatement, sans qu'on ait rien vu d'étranger, apparaît à la même place une figure toute semblable à la première, sauf un léger changement de position, qu'on prend naturellement pour un mouvement que cette première figure vient d'exécuter. Ce que nous disons du dessin qui est directement vis-à-vis le trou s'applique aux autres, de sorte que tout le disque paraît couvert de figures animées. On fait aussi le phénakisticope simplement avec le disque percé qui porte alors les dessins sur une face qu'on présente à un miroir; l'image alors remplace le second disque. Le mot phénakisticope signifie apparition entrecoupée.

Usages du disque à jour. 1614. En regardant ainsi à travers un disque à jour tournant avec une vitesse convenable, on reconnaît la forme de certains corps en mouvement, comme s'ils étaient en repos.

Par exemple, sur une roue qui tourne très vite, on distingue les rais comme s'ils étaient immobiles. En effet, lors du passage d'une fente devant l'œil, on voit la roue dans une certaine position ; et son image, qui persiste dans l'œil, reste immobile jusqu'au passage de la seconde fente. Or si on est maître de la vitesse du disque, on peut très bien faire que la roue se retrouve dans la même position toutes les fois qu'une fente passe devant l'œil. On entretiendra de cette manière une image invariable tant de temps que l'on voudra ; l'essentiel est 1° de ne laisser voir l'objet que pendant un temps assez court pour que son déplacement soit insensible ; 2° de ne le laisser voir que quand sa forme est redevenue la même ; 3° de le laisser voir à des intervalles assez rapprochés pour que l'image persiste dans l'œil. Ce procédé s'appliquerait à l'examen des veines liquides formées de gouttes séparées (425), car en entretenant le niveau constant, la forme est invariable, de sorte que la deuxième condition est toujours remplie. En regardant la flamme d'une chandelle à travers le disque à jour, M. Plateau s'est assuré que quand elle présente de grandes oscillations, cette flamme n'est pas continue ; sa partie supérieure est alors formée de flammèches qui montent séparément à la suite les unes des autres. On doit encore à M. Plateau un procédé pour compter à l'aide du disque à jour les vibrations des tiges et des cordes.

Images accidentelles.

1615. Après la contemplation de certains objets du soleil couchant, par exemple, il reste sur la rétine des impressions qui durent un temps considérable, en présentant des phénomènes variés. Nous les résumerons ainsi d'après M. Plateau, qui les a étudiés avec beaucoup de soin :

1° Persistance généralement très courte de l'impression primitive.

2° Développement d'une impression opposée qu'on appelle *image accidentelle* ; c'est une image obscure si l'objet est clair, claire si l'objet est obscur ; nous faisons ici abstraction des couleurs.

3° Ordinairement disparition et réapparitions successives plus ou moins nombreuses de l'image accidentelle, et, dans certains cas, apparitions alternatives de l'impression primitive et de l'image accidentelle.

Voici les moyens que M. Plateau conseille d'employer



pour observer toutes ces apparences. L'un des yeux étant fermé et couvert avec un mouchoir, on adapte à l'autre un tube noirci d'environ 50 centimètres de long et 3 de large. On regarde fixement pendant une minute, au moins, un papier blanc bien éclairé et assez grand pour que les bords en soient cachés par le tube; c'est alors comme si on regardait un objet blanc sur un fond entièrement noir. Enlevant subitement le tube, on ferme l'œil, et on le couvre exactement comme l'autre. Alors on voit dans cette obscurité complète se manifester toutes les apparences que nous avons indiquées. L'image accidentelle, qui est une tache circulaire noire, s'efface et reparaît un très grand nombre de fois en diminuant d'intensité. L'image primitive sous la forme d'une tache circulaire blanchâtre se montre moins distinctement, et ses apparitions ont moins de durée.

Tous ces phénomènes se manifestent encore lorsqu'au lieu de tenir les yeux fermés et couverts, on regarde une large surface blanche, comme le plafond d'un appartement, ou bien quand on se découvre les yeux, sans cependant les ouvrir; la faible lumière qui traverse alors les paupières produit l'effet d'un fond modérément éclairé.

On peut très bien obtenir des images accidentelles sans le tube et en regardant simplement un objet blanc sur un fond noir, ou un objet noir sur un fond blanc; mais les phases sont ensuite moins marquées à cause des impressions produites par les objets environnants.

Elles tiennent à une modification de la rétine.

1616. Ce qui prouve bien que les images accidentelles ne sont pas un simple effet de l'imagination, mais qu'elles tiennent à une modification physiologique de l'organe, c'est qu'elles paraissent plus ou moins grandes selon la distance de la surface sur laquelle on les projette. On conçoit en effet qu'une tache d'une étendue déterminée sur la rétine doit paraître couvrir un espace plus grand sur un mur éloigné que sur un papier voisin de l'œil, puisque l'angle soutendu reste le même. L'illusion, dans ce cas, est la même que pour la lune horizontale (1602).

Influence de la lumière et de l'obscurité.

1617. Il est à remarquer que le premier effet d'une lumière modérée est de produire l'image accidentelle; et qu'au contraire l'image primitive reparaît ordinairement à l'instant où l'on rentre dans l'obscurité. Mariotte a signalé un cas où

ces effets sont très marqués. Il suffit, pour cela, de regarder quelque temps une fenêtre dont les châssis se projettent en noir sur le ciel. Au moment où l'on se couvre les yeux, on a l'image primitive avec ses carreaux lumineux et ses châssis obscurs; mais si on permet à la lumière de traverser les paupières, ou si l'on ouvre les yeux en les portant sur un mur blanc, aussitôt les carreaux deviennent obscurs et les châssis lumineux; si on se couvre les yeux, le premier effet reparaît, et on peut reproduire ces alternatives un très grand nombre de fois coup sur coup; c'est même un moyen de donner plus de vivacité à l'image accidentelle. Cette expérience se fait encore très bien après avoir regardé le soleil couchant.

1618. Les impressions sur la rétine ne s'étendent pas seulement en durée, elles s'étendent aussi en largeur. Ainsi, peu de temps après la nouvelle lune, le croissant paraît faire partie d'un cercle sensiblement plus grand que le reste du disque qui n'est éclairé que par la lumière cendrée. Deux cercles de même diamètre, l'un blanc sur un fond noir, l'autre noir sur un fond blanc, paraissent inégaux, quoique à la même distance. Et cette inégalité n'est pas un effet de l'imagination, car on la retrouve encore en mesurant les angles soutendus. On doit donc admettre que l'impression produite par une surface lumineuse s'étend un peu au-delà de l'image projetée sur la rétine; c'est en cela que consiste le phénomène de l'*irradiation*. **Irradiation.**

D'après les recherches de M. Plateau, l'irradiation varie considérablement d'une personne à une autre, et même d'un jour à l'autre pour la même personne : son étendue dépend aussi de l'éclat de la surface. Un fait très curieux est que quand deux objets lumineux d'un éclat égal ne sont séparés que par un petit intervalle, chacun d'eux exerce sur l'irradiation de l'autre une action qui la diminue, de sorte que les deux irradiations en regard décroissent à mesure que les objets lumineux se rapprochent, et finissent par s'annuler lorsque le contact a lieu. C'est à cette espèce de neutralisation de deux irradiations voisines que nous sommes redevables de pouvoir distinguer les traits les plus fins de l'écriture et apercevoir un cheveu ou même un fil de cocon projeté sur le ciel. Voilà aussi pourquoi l'irradiation est insensible avec les mi-

cromètres à double image. M. Plateau a reconnu aussi qu'elle était diminuée par l'emploi des lentilles convergentes, et par conséquent, moindre dans les lunettes astronomiques qu'à l'œil nu ; au contraire les lentilles divergentes l'augmentent.

Auréoles accidentelles.

1619. Au-delà des points affectés par l'irradiation il se développe quelquefois dans une étendue considérable une impression opposée à celle de l'objet, c'est-à-dire obscure si l'objet est clair, et claire si l'objet est obscur. On l'appelle *auréole accidentelle*. Les effets du contraste si bien étudiés par M. Chevreul sont, en général, dus à l'influence réciproque des auréoles accidentelles. Ainsi, par leur juxta-position, le blanc devient plus éclatant, et le noir plus foncé ; lorsque deux objets voisins diffèrent en clarté, cette différence paraît, en général, augmentée par leur voisinage. Il y a plus, des objets modérément éclairés peuvent disparaître complétement lorsque leur image se peint sur la rétine dans le voisinage d'une partie de l'organe vivement excitée par la présence d'un objet brillant. On peut aisément se convaincre de ce fait en regardant des objets placés à peu près derrière la flamme d'une bougie. Ces objets paraissent d'autant plus sombres, que leur image est plus rapprochée de celle de la flamme ; et lorsque la distance est très petite, ils disparaissent entièrement. Les phénomènes des auréoles accidentelles et du contraste présentent surtout de l'intérêt relativement aux couleurs, comme nous le verrons plus loin. Nous indiquerons alors des expériences, d'où il résulte qu'au-delà de l'auréole accidentelle qui alors a peu de largeur, il se développe quelquefois une *auréole secondaire* présentant la couleur affaiblie de l'objet.

Loi du contraste.

Auréoles secondaires.

Lois de la sensibilité de la rétine.

1620. Les phénomènes qui succèdent à la contemplation d'un objet ou qui accompagnent cette contemplation, révèlent quelques unes des lois auxquelles est soumise la sensibilité de la rétine. Ainsi, comme l'observe M. Plateau, lorsqu'elle est subitement soustraite à l'action des rayons émanés de l'objet, son état d'excitation persévère d'abord pendant quelque temps en s'affaiblissant, mais sans changer de nature, et de là résulte la persistance de l'impression primitive. Mais bientôt cet état de l'organe fait place à un état *opposé*, d'où résulte l'image accidentelle. Cette nouvelle sensation atteint un maximum d'intensité et s'affaiblit en-

suite à son tour, en présentant ordinairement une marche oscillatoire plus ou moins régulière, tantôt se bornant à disparaître et à reparaître successivement, tantôt alternant avec des réapparitions de l'impression primitive.

Les phénomènes qui se développent autour de la partie affectée sont par rapport à l'espace ce que les autres sont au temps, l'analogie est évidente. En effet, l'excitation causée par la lumière se propage jusqu'à une petite distance autour de la partie frappée, sans changer de nature en produisant le phénomène de l'irradiation; au-delà de cette limite se manifeste un état *opposé* de l'organe d'où résulte l'auréole accidentelle; et enfin, dans certains cas, à une distance plus grande encore, se produit une faible impression qui ressemble à celle de l'objet. Ainsi, dans ce cas, nous avons des oscillations selon l'espace, au lieu d'oscillations selon le temps. Ces oscillations, du reste, ont une analogie évidente avec le mouvement d'un corps écarté d'une position d'équilibre stable; avec le mouvement du pendule, par exemple, ou celui des ondes à la surface de l'eau.

CHAPITRE V.

DES DIFFÉRENTES ESPÈCES DE LUMIÈRE OU DES COULEURS.

§ Ier. *Analyse de la lumière par la réfraction.*

1621. L'œil nous fait reconnaître différentes espèces de lumière qu'on appelle en général *couleurs*. Jusqu'ici nous nous sommes occupés seulement de la lumière blanche; maintenant nous allons rechercher les particularités que présentent les différentes espèces de lumière dans les phénomènes précédemment étudiés, de la réfraction, de la réflexion, etc. **Ce qu'on entend par couleurs.**

1622. Établissons d'abord un fait capital, c'est que les différentes couleurs se réfractent inégalement. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à mettre bout à bout sur un papier noir deux petites bandes, l'une rouge, et l'autre violette : en re- **Inégale réfrangibilité des couleurs.** Fig. 433.

gardant à travers un prisme, on reconnaîtra qu'elles ne sont plus sur la même ligne, et que la bande rouge est moins déviée que la bande violette.

Phénomène de la dispersion. Fig. 434.

1623. Il est clair, d'après cela, que si des rayons de diverses couleurs R J V arrivent à un prisme A les uns à la suite des autres dans une même direction, ils se sépareront par la réfraction et suivront des routes différentes. C'est en cela que consiste le phénomène de la dispersion, qui offre, comme on voit, un moyen bien simple d'analyser une lumière donnée, c'est-à-dire de séparer les différentes couleurs dont elle peut être composée. Observons qu'à cause de la grande vitesse de la lumière et de la durée de la sensation, les rayons d'une même couleur, quoique formés de portions discontinues à leur sortie du prisme, peuvent très bien paraître continus et éclairer sans interruption apparente les points R', J', V'.

Décomposition de la lumière solaire. Fig. 435.

1624. Pour analyser la lumière solaire, on n'a qu'à mettre un prisme A d'un angle de 60° environ sur le trajet d'un rayon de soleil introduit dans une chambre obscure : alors on reconnaît que cette lumière qui paraît blanche, est réellement composée d'un grand nombre de couleurs; car, à la sortie du prisme, on a des rayons diversement colorés, qui divergent à cause des déviations différentes qu'ils ont éprouvées; de sorte qu'en tombant sur une surface blanche, ils y forment non plus une tache S blanche et ronde comme avant l'interposition du prisme, mais une figure oblongue N R nuancée des plus vives couleurs et qu'on appelle le *spectre solaire*. On reconnaît dans le spectre solaire sept couleurs principales distribuées dans l'ordre suivant, qui forme un vers alexandrin : *violet*, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge*. Le violet est la couleur la plus déviée; les autres le sont de moins en moins. Le passsage d'une couleur à l'autre se fait par nuances insensibles.

Constitution du spectre solaire. Fig. 435.

1625. Pour concevoir la formation du spectre solaire, imaginons qu'on applique un verre rouge sur l'ouverture de la chambre obscure; alors on aura seulement un rayon rouge, qui, dévié par le prisme, mais non dispersé, viendra peindre en R une tache rouge. Cette tache sera circulaire si le prisme est dans la position newtonienne (1493), et si le tableau est bien perpendiculaire au rayon. Rempla-

çant ensuite le verre rouge par un verre violet, on aura un cercle violet en V, et ainsi de suite pour les couleurs intermédiaires ; d'où l'on conclut que le spectre est réellement formé d'autant de cercles qu'il y a de nuances dans la lumière du soleil ; ce qui doit donner une bande à bords parallèles terminée par deux demi-cercles. De loin, la partie violette paraît plus étroite, parce que cette espèce de lumière est plus faible, et que d'ailleurs la dispersion de ses nuances est plus grande ; de sorte que les bords où les cercles se recouvrent moins ne sont pas assez éclairés pour être bien visibles. Fig. 436.

1626. Au lieu de recevoir le spectre sur un tableau, on peut le recevoir dans l'œil placé derrière le prisme ; mais alors pour que les couleurs soient distinctes, il faut que le prisme soit loin du trou, parce que l'effet de l'instrument étant en définitive de donner des images colorées du trou rangées sur la même ligne, ces images risqueront d'autant moins de se confondre qu'elles seront plus étroites. Or leur largeur sur la rétine est d'autant plus petite qu'on est plus loin du trou (1497). Observons d'ailleurs que la longueur du spectre sur la rétine est à peu près constante, car l'angle des rayons rouges et violets ne varie pas. Spectre reçu dans l'œil.

1627. Il y a plusieurs manières de recomposer la lumière solaire. En recevant les diverses couleurs du spectre sur de petits miroirs plans qu'on incline de manière à concentrer tous les rayons sur un même point, on reforme de la lumière blanche. On obtient le même résultat avec un miroir concave ou avec une lentille. Quand un prisme est assez long pour qu'on puisse à travers lui regarder le spectre qu'il forme, au lieu d'un spectre on voit tout simplement une tache de lumière blanche sur le tableau, précisément comme s'il n'y avait pas de prisme : il est clair que les divers points R′ J′ V′ du spectre se voient par des rayons ramenés dans la direction unique V J R par des réfractions inverses. Si on fait tourner rapidement un disque divisé en 7 secteurs peints des couleurs du spectre dans des proportions convenables (1662), on ne voit plus qu'une surface blanche tirant un peu sur le gris à cause de l'impureté des matières colorantes. Recomposition de la lumière solaire. Fig. 434.

1628. La recomposition se fait d'une manière bien remarquable dans le cas des milieux terminés par des faces Cas des milieux à faces parallèles.

Fig. 437. parallèles. Soit, par exemple, une lame de verre AB, sur laquelle tombe obliquement un rayon ST, qui, dispersé à son entrée, donne un rayon rouge TR, lequel émerge suivant RR parallèlement au rayon incident ST (1473). On aura de même un rayon violet VV parallèle à RR; et si le faisceau incident a une certaine largeur, un rayon S′T′ donnera un rayon rouge T′R′, lequel émergera précisément suivant VV, de sorte que, suivant cette ligne, il y aura un rayon rouge et un rayon violet. On démontrerait de même qu'il y aura un rayon jaune, et en définitive, un rayon de chaque couleur. Du reste, il est facile de voir qu'il ne peut y en avoir qu'un de chaque couleur. Ainsi la lumière blanche se recomposera dans cette direction à l'aide de sept couleurs empruntées à sept rayons incidents différents, et le faisceau incident donnera un faisceau émergent de lumière blanche. A la vérité, il doit y avoir des couleurs isolées sur les bords, mais on ne les distingue que quand l'épaisseur est très considérable.

L'explication que nous venons de donner s'appliquerait aisément à la recomposition de la lumière qui traverse deux prismes égaux et opposés, ou bien au cas de la petite cuve en verre qu'on montre ordinairement dans les cours d'optique; une cloison diagonale la divise en deux cases qui chacune forment un prisme quand on y verse de l'eau.

Fig. 438.
Fig. 439.

Moyen d'isoler les couleurs dans le spectre.

1629. Les expériences que nous venons d'indiquer sur la décomposition et la recomposition de la lumière prouvent rigoureusement qu'un rayon de soleil est formé de rayons de diverses couleurs. Newton, à qui l'on doit cette découverte capitale, a donné en outre le moyen d'isoler exactement les couleurs qui dans le spectre obtenu par le procédé ordinaire empiètent toujours un peu les unes sur les autres. Pour cela réduisons d'abord le trou de la chambre obscure à un simple point. Les rayons auxquels ce trou donne passage sont à la rigueur divergents, puisqu'ils viennent de tous les points du soleil, mais nous savons qu'avec une lentille on pourrait les faire converger et obtenir un point lumineux qui serait l'image réelle du trou. Or, si nous mettons le prisme sur le trajet du faisceau divergent, nous aurons, à sa sortie, autant de faisceaux divergents qu'il y a de couleurs, et chacun d'eux, rendu convergent par la len-

tille, donnera une image colorée du trou. Toutes ces images, rangées les unes à la suite des autres, suivant la réfrangibilité des rayons, formeront un spectre linéaire où chaque couleur n'occupera qu'un point. Avec une fente, au lieu d'un trou, on aura autant de spectres linéaires que de points dans la fente, ce qui formera une espèce de ruban où les couleurs auront plus d'étendue, quoique toujours aussi bien séparées. La lentille doit être loin de la fente (1626) et le prisme près de la lentille, afin de recevoir tous les faisceaux émergents.

1630. Une expérience due encore à Newton démontre que les couleurs isolées par la réfraction sont indécomposables par des réfractions nouvelles. Derrière la lentille, on met un second prisme à angle droit avec le premier, de manière qu'il reçoive, suivant sa longueur, les faisceaux qui tendent à former un spectre linéaire; alors chaque couleur se déviant suivant son degré de réfrangibilité, on a un spectre oblique, mais pas de dispersion ni de décomposition nouvelle, malgré cette nouvelle réfraction. On peut aussi faire cette expérience en regardant le spectre à travers un prisme qui lui soit parallèle. *Les couleurs du spectre sont indécomposables par la refraction.*

1631. En recevant dans l'œil le spectre donné par une ligne lumineuse (1626), Wollaston y a reconnu des lignes obscures provenant évidemment de ce que des rayons d'une certaine réfrangibilité manquent dans la lumière du soleil. Ces raies ne sont pas distinctes sur un tableau, parce que les rayons de chaque couleur vont en divergeant; l'œil, au contraire, les rassemble, mais comme son foyer est fort court, le spectre qui se peint sur la rétine a de très petites dimensions, et beaucoup de détails échappent même quand on emploie plusieurs prismes pour augmenter la dispersion. *Raies du spectre.*

Fraunhofer a imaginé de remplacer l'œil par une lentille à long foyer, ce qui rentre dans l'expérience de Newton (1629); mais au lieu de recevoir le spectre sur un tableau, il l'a regardé à la loupe comme une image aérienne dans une lunette. Son appareil se réduit même à une lunette *achromatique* placée tout contre le prisme qui est établi à quelques mètres de la fente. Il faut que la lunette ait assez de tirage pour donner une image nette à cette petite distance; la fente ne doit pas avoir plus d'un demi-millimètre de largeur. Presque tous les prismes ont des parties assez

pures pour qu'on puisse apercevoir quelques raies à l'œil nu, surtout quand la fente est un peu longue ; mais il est très difficile d'en trouver qui soient sans stries dans une assez grande étendue pour rendre praticable l'expérience avec la lunette ; cependant, avec de l'eau ou différents liquides, on peut toujours en faire qui remplissent cette condition. La figure 440 donne les raies principales observées par Fraunhofer avec un prisme de flint-glass d'une admirable pureté ; elles sont désignées par les lettres B C D F G H : B est dans le rouge, près de son bord extérieur ; C, qui est une ligne large et noire, se trouve au-delà du milieu du rouge ; D est dans l'orangé, dans la nuance jaune paille ; c'est une ligne double ; E est dans le vert et se compose de plusieurs lignes, celle du milieu étant la plus forte ; F est dans le bleu, G dans l'indigo et H dans le violet. Outre ces lignes, faciles à trouver et qui servent de repère, il y en a environ cinq ou six cents plus ou moins marquées et qui sont surtout très serrées dans le violet.

Fig. 440.

Étendue relative des couleurs dans le spectre.

1632. Les raies n'établissent aucune démarcation tranchée entre les couleurs du spectre ; ces couleurs se fondent insensiblement les unes dans les autres ; leur étendue relative dépend d'ailleurs de la matière du prisme. Voici cependant quelques mesures approchées données par Newton pour un verre dont la nature n'est pas bien connue. Nous ajoutons les résultats obtenus par Fraunhofer avec du flint-glass. On suppose le spectre divisé en 360 parties.

	Rouge.	Orange.	Jaune.	Vert.	Bleu.	Indigo.	Violet.
Newton....	45	27	40	60	60	48	80
Fraunhofer.	56	27	27	46	48	47	109

Répartition de la lumière.

1633. La lumière n'est pas également forte dans toutes les parties du spectre. D'après les expériences de Fraunhofer, le maximum de clarté se trouve à la séparation du jaune et de l'orange ; en représentant par 100 la clarté en ce point, on a les valeurs suivantes près des raies principales :

B	C	D	E	F	G	H
3	9	64	48	17	3	½

Ces résultats peuvent un peu varier suivant les prismes.

1634. Après avoir analysé la lumière du soleil à l'aide du prisme, voyons maintenant les résultats obtenus pour les autres sources lumineuses. Les étoiles donnent à peu près les mêmes couleurs que le soleil; cependant les raies qu'on peut apercevoir ont en général des positions différentes, ce qui prouve que les rayons manquants ne sont pas les mêmes. Un grand nombre d'étoiles sont colorées; ainsi *Aldébaran* est rouge, d'autres sont jaunes, bleues, etc.; mais jamais leur lumière n'est simple, seulement la couleur de l'étoile domine dans le spectre qu'elle donne. C'est surtout parmi les étoiles doubles qu'on en rencontre de colorées. Le plus souvent la couleur est la même pour les deux étoiles, mais quand elle est différente elle est ordinairement jaune ou rouge pour l'étoile principale, tandis que l'étoile satellite offre la teinte bleuâtre du côté opposé du spectre. Cette couleur bleue n'est point un effet de contraste, car on rencontre aussi des satellites jaunes et des étoiles doubles dont une seule est colorée. Analyse de la lumière des étoiles et des planètes.

Fraunhofer a trouvé que la lumière de la lune et des planètes présentait les mêmes couleurs et les mêmes raies que la lumière du soleil.

1635. La lumière artificielle, ainsi que la lumière naturelle, est toujours composée; le spectre est à peu près le même; il y a seulement quelques couleurs qui manquent et d'autres qui se trouvent en excès. On ne voit pas de raies obscures dans les flammes blanches employées à l'éclairage; il y a, au contraire, quelques lignes brillantes plus distinctes que le reste du spectre, et qui résultent évidemment d'un excès de rayons d'une même réfrangibilité. Ainsi on observe une ligne orangée très vive dans le spectre d'une chandelle. Analyse des lumières servant à l'éclairage.

1636. On sait que la plupart des combustibles composés d'hydrogène et de carbone, comme le suif, l'huile, le papier, l'alcool, etc., donnent des flammes bleues quand la combustion est encore imparfaite. En recevant la lumière de ces flammes bleues à travers une fente étroite pour la décomposer à l'aide d'un prisme, on obtient des spectres discontinus, consistant la plupart en portions étroites, séparées par de larges intervalles, entièrement noirs, ou beaucoup plus obs- Flammes colorées.

eurs que le reste; les couleurs qui prédominent sont le jaune, resserré entre d'étroites limites, le vert jaunâtre, le vert d'émeraude et beaucoup de violet.

La flamme du cyanogène, qui est d'une teinte pourpre bordée d'un jaune verdâtre, offre aussi un spectre divisé par des bandes obscures. Les feux d'un rouge cramoisi qu'on produit sur les théâtres avec le nitrate de strontiane donnent plusieurs espèces de rouge et de jaune avec de nombreuses solutions de continuité. Mais la circonstance la plus remarquable est la formation d'une ligne extrêmement brillante, d'un bleu vif et bien séparée de tout le reste. Un spectre encore fort curieux est celui que donne le chlorure de cuivre dissous dans l'alcool; il est rempli de raies colorées rangées
Fig. 441. deux à deux, comme l'indique la figure 441.

Pour apprécier aisément les couleurs que différentes substances donnent à la flamme, on n'a qu'à en imprégner la mèche d'une lampe à alcool. On voit ainsi que les sels de soude donnent du jaune; les sels de potasse un violet pâle; les sels de chaux un rouge de brique; dans leurs spectres on remarque une ligne jaune et une ligne verte. Les sels de baryte donnent un vert pomme assez pâle, mais on l'avive beaucoup par le contraste avec une flamme rougie par la strontiane. Le cuivre et les sels de cuivre donnent du bleu verdâtre ou du vert pur. Avec l'acide borique on a aussi du vert. Avec le sulfate de fer, la flamme est blanche. L'arsenic, l'antimoine et le plomb colorent en bleu la flamme du chalumeau.

Flamme monochromatique.

1637. Le soufre, quand il brûle lentement, offre une couleur bleue très composée. Mais quand on le projette dans un creuset chauffé à blanc, il fournit une lumière jaune pâle, très vive, et presque indécomposable par le prisme. On se procure encore plus aisément une lumière d'une seule couleur avec une lampe alimentée par de l'alcool auquel on ajoute le quart de son volume d'eau saturée de sel ordinaire; il est bon de saupoudrer de sel le sommet et les côtés de la mèche. Cette lampe *monochromatique*, qui est d'un emploi très fréquent en optique, peut se faire avec un verre à boire, muni d'un couvercle en fer blanc que traverse une fente rectangulaire de même métal, ayant un centimètre de large sur cinq à six de long, car il est souvent nécessaire

d'avoir une flamme très étendue. Un tuyau dépassant d'environ deux centimètres le dessus et le dessous du couvercle, est rempli par une mèche de coton qui descend jusqu'au fond du verre et s'élève de deux centimètres au-dessus du tuyau. Le verre doit être à peu près plein; il est quelquefois nécessaire de chauffer un peu le liquide. La couleur de la flamme est le jaune paille ou l'orangé pâle voisin de la raie D de Fraunhofer dans le spectre solaire, l'indice de réfraction est le même d'après les expériences de M. Babinet. Cependant la lumière n'est pas tout-à-fait homogène; avec un prisme de 60° on sépare du vert, du bleu, de l'indigo et du violet, mais ces couleurs sont très faibles.

1638. Il nous reste maintenant à analyser la lumière que rayonnent les corps éclairés (1384). Si nous examinons à travers le prisme un petit morceau de papier blanc, nous retrouvons toutes les couleurs de la lumière solaire; c'est même dans le spectre obtenu avec une bande étroite de bois blanc que Wollaston a d'abord vu les raies 1631. Les corps doivent leur couleur à ce qu'ils renvoient de préférence certains rayons; ils nous paraissent rouges, jaunes ou bleus, suivant que le rouge, le jaune ou le bleu dominent dans leur rayonnement. Mais leur lumière est toujours composée; on ne connaît aucun corps qui ait la propriété de n'émettre des rayons que d'une seule couleur. Le rouge le plus vif des fleurs, les matières colorantes les plus pures donnent toujours un spectre nuancé de diverses couleurs; seulement il y en a quelques unes qui peuvent manquer. Pour analyser les couleurs d'un corps on en découpe une bandelette étroite qu'on expose à une forte lumière sur un fond d'un noir mat pour éviter les couleurs étrangères. On la regarde ensuite à la distance de un ou deux mètres avec un prisme de flint-glass d'un angle de 60° environ, dont les arêtes doivent être parallèles à la bandelette. *Analyse de la lumière des corps éclairés.*

1639. D'après ce que nous venons de dire, on conçoit aisément la formation des franges colorées sur les contours des objets qu'on regarde à travers un prisme. On voit ces franges seulement vers les bords, parce qu'ailleurs la lumière se recompose par des superpositions; il est clair qu'il ne peut pas y en avoir le long d'un bord contenu dans la section principale (1491); au contraire elles ont leur plus grande largeur *Franges colorées autour des objets.*

vers les bords parallèles aux arêtes du prisme. Si ces bords sont un peu longs, ils paraissent courbes à cause des déviations plus fortes qui ont lieu hors de la section principale ; les rayons traversant réellement alors un prisme d'un plus grand angle. Quand l'objet est noir sur un fond clair, les franges irisées sont évidemment produites par le fond ; c'est le cas des barreaux de fenêtre ou d'une raie noire sur le papier ; d'après cette remarque il est toujours aisé de se rendre compte de l'ordre des couleurs.

Analyse de la chaleur par le prisme.

1640. En même temps qu'il disperse la lumière comme nous venons de le voir, le prisme disperse aussi la chaleur ; ce qui prouve que les rayons calorifiques, qu'il ne faut cependant pas confondre avec les rayons lumineux (1264), ont comme ceux-ci la propriété de se réfracter, et de se réfracter inégalement. Pour étudier la dispersion de la chaleur et sa répartition dans les différentes parties du spectre, M. Melloni s'est servi d'un prisme de sel gemme, parce que cette substance, que traversent tous les rayonnements calorifiques des sources terrestres avec la même intensité, ne doit pas altérer les rapports d'énergie des divers rayons calorifiques donnés par le soleil. Il a trouvé que la température augmentait depuis le violet jusqu'au rouge ; elle est peut-être trente fois plus élevée dans le rouge que dans le violet. Mais ce qu'il y a de bien remarquable, c'est qu'elle croît encore dans l'espace obscur jusqu'à une distance de la limite rouge à peu près égale à celle du jaune ; le décroissement est ensuite assez rapide, de sorte qu'il n'y a plus de chaleur sensible dans la bande obscure dont l'éloignement au rouge est d'environ un tiers de la longueur du spectre lumineux. Avec une autre substance que le sel gemme, la répartition de la chaleur dans le spectre est changée à cause de l'inégale absorption des rayons calorifiques (1656).

Action chimique des rayons lumineux.

1641. On sait depuis long-temps que la lumière a de l'influence sur un grand nombre de phénomènes chimiques : ainsi elle décompose l'acide nitrique, elle réduit les oxides d'or et d'argent ; elle détruit certaines couleurs et en développe d'autres. Mais ces effets sont complexes ; pour avoir des idées justes sur l'action chimique de la lumière, il est nécessaire d'opérer avec les divers rayons simples, ce que le prisme permet de faire. On reconnaît ainsi que, tantôt les uns, tantôt

les autres, ont une influence plus forte, suivant la substance sur laquelle ils agissent. En général, cependant, l'action chimique est plus marquée dans les rayons les plus réfrangibles, qu'on appelle à cause de cela rayons chimiques. Ainsi c'est aux rayons bleus et violets qu'est particulièrement due la propriété qu'a la lumière d'exciter la phosphorescence (1383), de déterminer la combinaison du chlore avec l'hydrogène, avec l'oxide de carbone, de développer la couleur verte des plantes qui, comme on sait, restent étiolées dans l'obscurité. Si on fait tomber le spectre sur une surface blanchie par du chlorure d'argent, en quelques minutes les points frappés par les rayons bleus et violets ont noirci, tandis que le reste n'éprouve rien encore. Il y a plus: avec des prismes de flint, substance douée d'un grand pouvoir dispersif, Seebeck et Wollaston ont constaté que le chlorure d'argent noircissait un peu au-delà du violet, dans un point par conséquent où il n'y a ni lumière ni chaleur sensible. Le professeur Hessler a même observé le maximum d'effet chimique à 23 lignes au-delà du violet pour un prisme fait avec l'huile de casse; pour l'eau ce maximum était au milieu du violet; pour l'alcool il était près du bleu. Il a vu aussi que le temps nécessaire à l'effet complet variait suivant la substance du prisme. Wollaston a trouvé que le papier jauni par une solution alcoolique de résine de gayac et qui verdit au soleil ou à la lumière diffuse, était modifié en deux sens opposés par les rayons des deux extrémités du spectre; les plus réfrangibles le verdissant et les moins réfrangibles le ramenant au jaune. M. Biot a reconnu depuis qu'il y avait dans cette résine deux substances, l'une qui restait toujours jaune et l'autre qui, presque incolore d'abord, bleuissait par les rayons les plus réfrangibles pour se décolorer ensuite par les autres, d'où il suit que le vert qu'on observe ordinairement n'est qu'une teinte composée.

Il faut d'ailleurs observer que plusieurs causes interviennent dans certains phénomènes chimiques attribués à la lumière. M. Chevreul a fait voir que la lumière agissant seule dans le vide sec, n'a, pour modifier les matières colorantes, qu'une influence excessivement faible comparativement à celle qu'elle exerce concurremment avec l'air sec ou humide; ainsi des échantillons de coton, de soie, de laine

teints avec l'orseille, avec le carthame, couleurs si altérables, ayant été pendant deux ans exposés au soleil dans des flacons bien secs où l'on avait fait le vide, on leur a trouvé encore une fraîcheur et une hauteur de ton très remarquables. Au contraire le bleu de Prusse fixé sur les étoffes de coton, de soie ou de laine, se décolore mieux au soleil dans le vide que dans l'air.

Ce sont surtout les rayons les plus réfrangibles qui développent la phosphorescence (1383). En général la couleur de la lumière phosphorescente est indépendante de celle de la lumière incidente ; néanmoins dans quelques cas particuliers M. Daguerre l'a vue bleue sous l'influence des rayons bleus, et verte sous l'influence des rayons verts.

Dessins photogéniques. 1642. On est parvenu dans les derniers temps à produire des dessins par l'action chimique des rayons lumineux : voici la recette indiquée par M. Daguerre pour préparer un papier qui se colore très rapidement même à la lumière diffuse. On trempe du papier non collé dans de l'éther chlorhydrique faiblement acidifié par la décomposition lente qu'il éprouve avec le temps ; quand ce papier est bien sec, on le plonge dans une dissolution de nitrate d'argent ; on le fait sécher à l'obscurité, et sans feu ; puis on le garde dans un livre pour le préserver de l'air et de la lumière. Une feuille de ce papier mise au foyer d'une chambre obscure garde l'empreinte de l'image ; mais les objets clairs, le ciel par exemple, sont représentés en noir, et les objets obscurs comme les arbres sont représentés en blanc. Pour empêcher la lumière d'altérer ensuite ce dessin, il suffit d'ailleurs de baigner le papier dans une quantité d'eau suffisante pour le bien laver. M. Talbot prépare aussi un papier très sensible en le trempant à plusieurs reprises alternativement dans des solutions faibles de sel marin et de nitrate d'argent ; on doit avoir soin de le laisser sécher à chaque fois ; il n'y a pas d'inconvénient à employer le feu. Ce papier reçoit très bien les images de la chambre noire. Quand on veut seulement obtenir le calque d'une gravure, une immersion dans chaque solution suffit ; on lave ensuite dans une solution concentrée de sel marin pour arrêter l'action ultérieure de la lumière. Mais il y a toujours l'inconvénient des clairs rendus par du noir, et réciproquement ; pour l'éviter, M. Lassaigne noircit d'abord

entièrement le papier au soleil et l'imprègne ensuite d'une solution faible d'iodure de potassium. La feuille séchée étant mise derrière la gravure, les traits noirs de celle-ci préservent les parties correspondantes qui restent noires, tandis que les blancs laissent passer la lumière qui donne lieu à la formation d'un iodure d'argent jaune pâle ; il faut quelques heures d'exposition au soleil ; immédiatement après on lave le papier pour enlever les dernières portions d'iodure de potassium. Les calques ainsi obtenus peuvent rester exposés long-temps à la lumière diffuse et même directe sans s'altérer sensiblement; mais comme on le voit les clairs ont une teinte jaune.

MM. Niepce et Daguerre ont trouvé que les bitumes et surtout les résidus obtenus par la distillation des huiles essentielles étaient très sensibles à la lumière. Une solution alcoolique du résidu d'huile essentielle de lavande étant versée sur une lame de verre ou d'argent plaqué, laisse par l'évaporation une couche blanche, très mince, susceptible de prendre en quelques heures l'empreinte des images dans la chambre noire. Comme ces images sont très faibles, on les avive en exposant l'épreuve à la vapeur d'huile de pétrole. Celle-ci pénètre entièrement la substance dans les endroits où l'action de la lumière n'a pas eu lieu, et lui donne une transparence telle qu'il semble ne rien y avoir dans ces endroits ; ceux au contraire sur lesquels la lumière a vivement agi restent avec leur couleur blanche. Mais il est bien difficile d'obtenir ainsi des résultats satisfaisants.

1643. Le procédé imaginé en dernier lieu par M. Daguerre pour fixer les images de la chambre obscure est infiniment supérieur à tous ceux que nous venons d'indiquer, tant pour la beauté des résultats et leur inaltérabilité, que pour la sûreté et la promptitude de l'exécution. Il ne donne toujours, il est vrai, qu'un simple dessin sans coloration, mais outre que les noirs sont immédiatement rendus par des noirs et les clairs par des clairs, il y a une dégradation de teintes inimitable et une finesse de détails qui défie la loupe. Quelques minutes suffisent à la fixation de l'image quand le soleil éclaire les objets, mais même par un temps sombre et pluvieux une demi-heure au plus est nécessaire. L'effet est dû surtout aux rayons les plus réfrangibles ; ainsi à la rigueur Daguerréotype.

un objet rouge est reproduit avec moins de vivacité qu'un objet bleu; mais la différence n'est pas très grande, puisque les couleurs de la nature ne sont pas homogènes, et en revanche cette inégalité d'action peut avoir des avantages; si par exemple une trop vive lumière empêche l'immobilité nécessaire dans l'exécution d'un portrait d'après nature, on pourra n'éclairer qu'avec des verres bleus ou violets qui, tout en arrêtant les rayons les plus vifs, laisseront passer les plus efficaces. D'ailleurs le réactif est sensible même à la lumière de la lune, c'est en quelque sorte une rétine physique, dont l'emploi ne peut manquer de devenir extrêmement précieux dans les recherches de photométrie. Déjà par le temps nécessaire à la formation de l'image on a une mesure approchée de la transparence de l'atmosphère, si on opère à des instants où la hauteur du soleil est la même; et M. Daguerre a reconnu ainsi que cette transparence diminuait à mesure que le soleil était resté plus long-temps sur l'horizon; qu'elle était par exemple notablement moindre à trois ou quatre heures du soir qu'à neuf ou huit heures du matin.

Donnons maintenant une idée du procédé : Une lame de plaqué dont la face argentée doit être parfaitement décapée et polie, est exposée dans une boîte à l'évaporation spontanée de l'iode, jusqu'à ce que l'argent se soit recouvert d'une couche *jaune d'or* excessivement mince qui est de l'iodure d'argent. Ainsi préparée, cette lame se place dans la chambre noire, dont on a d'avance déterminé le foyer; au bout d'un temps qui varie comme nous l'avons dit, mais qui est ordinairement d'un quart d'heure, on la retire, et on l'expose à la vapeur du mercure sous une inclinaison de 45° dans une boîte garnie d'une glace pour qu'on puisse suivre les progrès de l'opération; au moment où elle sort de la chambre noire, la plaque n'offre aucun trait visible; mais sous l'influence de la vapeur mercurielle, peu à peu le dessin se manifeste; la lumière a modifié de telle sorte les parties qu'elle a frappées, que le mercure pénètre jusqu'à l'argent, où il se condense en gouttelettes microscopiques plus ou moins serrées, suivant que l'action a été plus ou moins forte; partout ailleurs l'argent reste défendu. La durée de l'opération est le temps qu'un kilogramme de mercure contenu

dans une capsule met à s'élever jusqu'à 75°, puis à redescendre vers 45°, quand on a retiré la petite lampe qui chauffait la capsule. Il faut alors laver la planche dans une dissolution de sel marin ou d'hyposulfite de soude; la teinte jaune qui voilait le dessin disparaît, il n'y a plus d'iodure, la lumière est désormais sans action, l'argent et le mercure restent seuls. Le mercure forme les clairs par un pointillé mat, l'argent forme les parties sombres, parce qu'étant poli comme un miroir, il ne renvoie la lumière que dans une certaine direction où l'on a soin de ne pas se mettre; il faut d'ailleurs que le jour ne vienne que d'un côté. On conçoit que l'épreuve ne peut supporter le frottement, car les gouttelettes qui forment le pointillé se confondraient et s'étaleraient sur la planche; on doit mettre celle-ci sous verre et coller exactement les bords. Les planches qu'emploie M. Daguerre sont à peu près de l'épaisseur d'une carte; elles ont six pouces sur huit; l'objectif de la chambre noire est achromatique et périscopique; il a quatorze pouces de foyer et trois pouces de diamètre; mais à deux pouces et demi en avant se trouve un diaphragme d'un pouce seulement d'ouverture. On peut redresser les objets avec une glace à faces parallèles ou avec un prisme réflecteur.

§ II. *Analyse de la lumière par la réflexion et par l'absorption.*

Inégale réflexibilité des rayons de diverses couleurs.

1644. L'analyse que nous venons de faire de la lumière est fondée, comme nous l'avons vu, sur ce que, pour un même angle d'incidence, les divers rayons colorés ont des angles de réfraction différents, de sorte qu'ils se séparent et prennent des directions différentes. Dans le phénomène de la réflexion, on n'observe plus cette dispersion des couleurs; l'angle de réflexion est toujours égal à l'angle d'incidence. Mais si l'angle de réflexion reste le même pour tous les rayons, la proportion de lumière réfléchie peut varier d'une couleur à l'autre, ce qui fournit un nouveau moyen d'analyse. La théorie montre que la proportion de lumière réfléchie dépend de l'indice de réfraction et de l'arbsorption plus ou moins forte. Cette proportion varie donc d'une couleur à l'autre; mais, en général, l'effet est insensible, excepté dans cer-

tains cas particuliers, les seuls que nous devions examiner ici.

1° Cas de la réflexion totale.

1645. Disposons un prisme pour avoir la réflexion totale (1422), puis inclinons-le par degrés pour laisser peu à peu passer de la lumière, nous verrons que les rayons rouges émergent quand tous les autres sont encore soumis à la réflexion totale; ensuite les rayons orangés, jaunes, verts, etc., passent successivement avec les rayons rouges à mesure qu'on incline le prisme. Il est clair, d'après cela, que les rayons de couleurs différentes ont des angles différents pour la réflexion totale. Le violet, par exemple, se réfléchit en totalité quand les autres ne se réfléchissent qu'en partie; cette couleur, qui domine dans le faisceau réfléchi, donne une teinte violette, un peu faible, il est vrai, parce qu'elle est délayée dans un grand excès de lumière blanche. Mais on peut avoir un effet plus marqué en décomposant par un second prisme le rayon réfléchi par le premier; les différentes couleurs du spectre se renforcent alors très sensiblement, à mesure qu'en inclinant le premier prisme on augmente pour les divers rayons la proportion de lumière réfléchie. On voit dans cette expérience que les rayons les plus réfrangibles sont aussi les plus réflexibles, c'est-à-dire qu'ils sont les premiers à éprouver la réflexion totale. Cela est évident d'ailleurs quand on se rappelle le moyen de calculer l'angle limite ou l'angle *critique* de la réflexion (1504); car l'indice étant plus grand pour le violet, par exemple, que pour le rouge, l'angle limite doit être plus petit pour le violet.

Limite colorée de la réflexion totale. Fig. 442.

1646. Un phénomène assez curieux, qui dépend de l'inégale réflexibilité des rayons, est la formation d'un arc coloré SS′ sur la base d'un prisme qu'on expose à la lumière du ciel. Depuis B jusqu'en S, la surface est brillante et incolore, parce que la réflexion est totale pour les rayons de toutes les couleurs. Depuis S jusqu'en S′, l'éclat s'affaiblit, parce que la réflexion totale se limite aux rayons les plus réfrangibles; il se produit ainsi une zone où dominent les couleurs de ces rayons, c'est-à-dire le bleu et le violet. Enfin, depuis S′ jusqu'à tout autre point plus rapproché de l'œil, la surface paraît sombre, parce que la réflexion n'est plus totale pour aucun rayon; quant à la courbure, elle provient de ce que l'œil reçoit aussi les rayons situés hors de la section principale (1639).

1647. Les surfaces imparfaitement polies ont la propriété de réfléchir en proportions plus considérables les rayons les moins réfrangibles. Si, par exemple, avec un morceau de verre dépoli, on regarde très obliquement une bougie, de manière que les rayons rasent la surface, on a une image rougeâtre, ce qui prouve bien que dans ce cas les rayons rouges se réfléchissent plus abondamment que les autres.

2° Cas des surfaces imparfaitement polies.

1648. Enfin l'inégale réflexion des rayons est surtout manifeste dans les cas de surfaces colorées. Il est clair, en effet, que si un corps nous paraît rouge, c'est que les rayons rouges dominent dans ceux qu'il nous renvoie. Chaque substance, suivant sa nature et l'état de sa surface, a ainsi la propriété de réfléchir certains rayons de préférence; nous ne remontons pas ici à la cause de cette propriété (1660), nous la prenons comme un fait. Notons seulement les circonstances *physiques* qui font varier la nuance et l'éclat des couleurs; il ne s'agit pas ici des couleurs changeantes et variées comme celles de la nacre de perle, des plumes de paon, etc., mais des *teintes plates* et uniformes qui constituent les couleurs ordinaires des corps.

3° Cas des surfaces colorées.

1649. Pour reconnaître l'influence que la lumière incidente a sur la couleur d'un corps, on n'a qu'à éclairer ce corps avec chacune des couleurs du spectre; s'il est blanc à la lumière du jour, on le verra alors successivement rouge, orangé, jaune, vert, etc. (1391); s'il est naturellement coloré, si c'est une fleur, par exemple, elle prendra encore différentes couleurs en traversant le spectre solaire; mais il y aura toujours quelques rayons qu'elle ne pourra pas renvoyer, de sorte qu'elle paraîtra noire dans ces rayons, pourvu qu'aucune autre lumière ne l'éclaire. On sait combien les lumières artificielles changent la nuance des objets : aux bougies, le drap bleu paraît vert; à la lueur du punch, les visages deviennent bleuâtres; sur les théâtres, les feux colorés donnent un reflet de leur couleur à tout ce qu'ils illuminent, une lame d'or, éclairée par les rayons provenant d'une autre lame d'or, paraît d'un jaune plus foncé qu'à la lumière du jour; avec deux lames un peu longues, bien polies et inclinées de 8 ou 10°, on peut avoir une douzaine de réflexions après lesquelles il ne reste plus que des rayons d'un rouge orangé très foncé; telle est sans doute la vraie couleur de

Influence de la lumière incidente.

l'or, qui dans ce cas n'est plus délayée par un excès de lumière blanche. On observe un phénomène semblable dans les vases d'or ou de *vermeil* un peu profonds. Deux lames de cuivre, après un certain nombre de réflexions, donnent une teinte rouge de feu très rapprochée de l'écarlate. L'argent finit ainsi par devenir d'un jaune de bronze; il en est à peu près de même de l'étain.

Influence de l'obliquité, du poli, etc. 1650. La couleur propre des corps s'efface de plus en plus à mesure que la lumière du jour tombe plus obliquement sur leur surface; des lames d'or et de cuivre finissent par donner, sous de grandes obliquités, des images qui ne sont pas plus colorées que dans les miroirs ordinaires. Au contraire, les miroirs de télescope, quoique d'un blanc presque parfait, colorent les objets d'une teinte légèrement rougeâtre, parce que les rayons tombent presque perpendiculairement. Le poli, comme l'obliquité, tend à effacer la couleur propre en augmentant la quantité de lumière réfléchie, mais jusqu'à un certain point il l'avive. C'est aussi en augmentant la quantité de lumière réfléchie que les vernis donnent de l'éclat aux couleurs.

Influence de la température. 1651. La couleur de certains corps change avec la température sans qu'il y ait pour cela d'action chimique, et la couleur se rétablit ensuite par le refroidissement. Voici quelques exemples de ce phénomène :

NOMS DES SUBSTANCES.	COULEUR A la température ordinaire.	COULEUR A une température élevée.
Cinabre ou vermillon.	Rouge.	Violet noir.
Minium.	*Id.*	*Id.*
Oxide de mercure.	*Id.*	*Id.*
Rubis balais, spinelle.	*Id.*	Vert, puis brun.
Orpiment.	Jaune.	Rouge.
Oxide de zinc.	Blanc.	Jaune.
Verre de cristal.	Incolore.	*Id.*

C'est quand il est assez mou pour qu'on puisse le travailler, que le cristal paraît jaune.

Absorption inégale des 1652. Après avoir étudié les couleurs de la lumière réfléchie, nous allons étudier celle de la lumière transmise. On a

cru long-temps que les verres de couleur, les liquides colorés, etc., *teignaient* la lumière blanche, à peu près comme les terres imprégnées d'une matière colorante teignent l'eau qui vient à les traverser. Mais il est aisé de voir qu'il n'en est pas ainsi. Prenons, par exemple, un verre rouge, et faisons-le passer dans le spectre solaire, nous reconnaîtrons qu'il est transparent pour les rayons rouges et opaque pour les autres; or, il est évident, d'après cela, que si ce verre transmet de la lumière rouge quand on l'expose directement au soleil, c'est tout simplement parce qu'il laisse passer les rayons rouges et qu'il arrête les autres couleurs. En général, ces couleurs ne sont pas arrêtées par la réflexion, car la lumière réfléchie par les milieux colorés est généralement blanche ou de même couleur que la lumière transmise. Il s'ensuit que les couleurs qui manquent sont absorbées (1392) pendant le passage, et nous sommes ainsi amenés à reconnaître que, suivant la nature des milieux, l'absorption s'exerce sur tels ou tels rayons de préférence, de sorte que les couleurs transmises sont le résultat de cette inégalité d'absorption. Ce que nous disons de la lumière du soleil s'applique à celle qui vient des autres corps; si les objets paraissent rouges avec un verre de cette couleur, c'est que ce verre laisse passer les rayons rouges que les objets envoient (1638), tandis qu'il absorbe les autres. — rayons de diverses couleurs.

1653. Il est très rare qu'un milieu absorbe complétement toutes les couleurs, à l'exception d'une seule; en général la lumière transmise est encore composée, et sa couleur n'est qu'une teinte dominante. Du reste on l'analyse facilement en regardant à travers un prisme une fente lumineuse couverte par le milieu coloré. On peut également placer celui-ci entre le prisme et l'œil, ou même se passer de prisme de verre en donnant au milieu coloré la forme d'un prisme. Ce dernier procédé permet d'apprécier l'influence de l'épaisseur en faisant passer les rayons plus ou moins loin du sommet de l'angle. — Analyse de la lumière transmise.

Indiquons maintenant quelques résultats. Certains verres noirs, qui remplacent aujourd'hui les verres enfumés dans les lunettes astronomiques, font voir le disque du soleil d'un blanc très pur; cette lumière blanche analysée par le spectre se compose de rouge, de jaune et de bleu. Le soleil — Cas remarquables.

paraît également blanc à travers une dissolution de 2 ou 3 millimètres de chlorure de chrome; il ne passe alors que du rouge et du vert. Une dissolution saturée de bichromate de potasse ne transmet plus que du rouge et du jaune quand elle a une épaisseur de plusieurs millimètres. La teinture bleue de tournesol saturée, sous une épaisseur d'un millimètre, absorbe complétement le jaune; le rouge alors est plus vif, ainsi que le vert qui gagne en étendue. Les verres d'un bleu d'azur, qu'on rencontre très communément dans le commerce, donnent, sous une épaisseur d'environ un millimètre et demi, un spectre dans lequel une partie du rouge est entièrement absorbée, de sorte qu'on voit à sa

Fig. 443. place une large bande noire N. Au-delà on retrouve encore du rouge sans aucun mélange d'orangé; vient ensuite une

Fig. 444. ligne noire N', puis du jaune très pur. Le vert et le bleu G sont ternes et mal terminés. Le violet V traverse presque sans perte. Quand l'épaisseur est grande, le rouge et le violet extrêmes passent seuls, la partie moyenne M du spectre est complétement absorbée. Au contraire, les verres colorés en vert par le deutoxide de cuivre laissent passer la partie moyenne et arrêtent les rayons extrêmes; aussi ces deux milieux transparents forment un corps opaque si on les superpose; un verre pourpre et un verre vert constituent aussi un milieu opaque.

L'espèce de lumière absorbée peut quelquefois servir à distinguer certaines substances. Ainsi avec le rubis, l'extrémité violette du spectre est supprimée, elle ne l'est pas avec le grenat; le rubis paraît presque noir à la flamme de l'alcool salé (1637), le grenat refléchit (1661), et transmet encore une grande quantité de cette lumière.

Couleurs simples par absorption.

1654. Avec certains verres colorés en rouge par le protoxide de cuivre, les couleurs autres que le rouge disparaissent à peu près complétement dans le spectre, de sorte qu'on a une lumière simple, qui est d'un grand emploi dans les recherches d'optique. On la simplifie encore avec un verre d'azur qui ne laisse plus que le rouge extrême. L'eau céleste (sulfate de cuivre et ammoniaque) dans un tube long de quelques pouces, fermé par des plaques de verre, donne de la lumière violette à peu près simple. Par des combinaisons de différents milieux on arrive à se procurer d'autres cou-

leurs bien isolées ; ainsi avec un verre d'azur, un verre vert et un verre brun, on ne laisse passer que la lumière jaune marquée N', fig. 442.

1655. Les couleurs qu'on isole ainsi par l'absorption sont indécomposables par le prisme, tandis que quelques unes de celles que donne le prisme peuvent se décomposer par l'absorption. Si par exemple l'orangé du spectre était absolument simple, les rayons orangés pourraient bien s'affaiblir à travers les différents milieux, mais ils ne donneraient jamais une autre couleur que l'orangé ; or, à travers un verre bleu (1653), l'orangé du spectre disparaît, et à sa place on voit du rouge. Les choses se passent donc comme si l'orangé se composait de rouge et de jaune ; mais ce jaune serait d'une espèce particulière, puisqu'il est absorbé par le verre sans que le jaune qui vient ensuite le soit. D'après l'analyse des couleurs prismatiques qu'il a faites ainsi à l'aide de différents milieux, M. Brewster croit que le spectre solaire se compose seulement de trois couleurs, le rouge, le jaune et le bleu. Il pense que ces couleurs superposées occupent chacune l'étendue entière du spectre, de sorte qu'il n'y a qu'un maximum d'intensité dans les points où l'on juge qu'une de ces couleurs existe seule. Mais cette manière de voir est généralement regardée comme inexacte.

Décomposition des couleurs prismatiques.

1656. Presque toutes les substances diathermanes absorbent de préférence les rayons calorifiques situés vers l'extrémité rouge du spectre, et en général, du moins pour les liquides et les solides non cristallisés, cette absorption des rayons les moins réfrangibles est d'autant plus forte que la substance est moins réfringente. Il en résulte ce fait curieux, que des prismes de flint, de crown, d'acide sulfurique et d'eau font successivement remonter le maximum de température du spectre jusque sur le jaune (1640). Les substances qui absorbent de préférence les rayons calorifiques situés du côté du violet sont les matières noires et le verre coloré en vert par le deutoxide de cuivre ; voilà pourquoi, en combinant ce dernier milieu avec l'eau, on arrête toute la chaleur solaire (1264, 1269). Mais l'action du noir de fumée est surtout remarquable ; si on en couvre légèrement une lame de sel gemme, substance sans absorption élective, on a un milieu qui est pour la chaleur ce qu'un verre rouge est pour la

Relation entre la réfrangibilité et l'absorption des rayons calorifiques.

lumière, car il transmet de préférence les rayons obscurs qui forment l'extrémité la moins réfrangible du spectre. Cette lame transmet aussi plus facilement la chaleur de l'eau bouillante ou du cuivre noirci que celle d'une lampe ou du platine incandescent. Cela prouve, comme on peut d'ailleurs s'en assurer avec un prisme de sel gemme, que la réfrangibilité moyenne des rayons calorifiques diminue avec le degré de chaleur du foyer rayonnant, de sorte que les rayons provenant des sources obscures sont moins réfrangibles que ceux qui viennent des sources incandescentes.

En résumé si on excepte le sel gemme, qui est pour la chaleur ce qu'est un verre incolore pour la lumière, on peut dire que l'absorption exercée par les différents milieux sur les rayons calorifiques est analogue à celle qu'exercent les verres colorés sur les rayons lumineux. Cependant on ne connaît pas de substance qui produise des solutions de continuité dans le spectre calorifique, comme cela arrive pour le spectre lumineux avec les milieux colorés (1653).

Absorption des rayons chimiques.

1657. L'action chimique des rayons isolés par l'absorption est, en général, semblable à celle des rayons qu'on isole par la réfraction. Qu'on mette une lame de verre violet ou bleu sur une carte enduite de chlorure d'argent, et qu'on expose le tout au soleil, on verra la partie cachée par le verre se colorer presque aussi vite que le reste. Au contraire le verre vert empêchera l'action chimique; il en est de même du mica vert; sous une lame de mica d'un millimètre d'épaisseur le chlorure d'argent est encore blanc après une demi-heure d'exposition au soleil. Cependant cette préservation ne dépend pas essentiellement de la couleur verte, car sous une émerande de 8 millimètres d'épaisseur on a vu le chlorure se colorer en brun. Le verre rouge foncé arrête presque entièrement les rayons *chimiques*, tandis que le grenat les laisse passer presque en totalité; mais aussi, comme on le reconnaît avec le prisme, les rayons violets se trouvent dans la lumière que transmet le grenat. Quelquefois néanmoins l'analyse de la lumière transmise ne rend pas compte des différences observées. Ainsi M. Biot a trouvé un verre d'un bleu verdâtre qui, avec le prisme, donne à peu près les mêmes résultats que le verre bleu ordinaire, et cependant ce verre absorbe si bien les rayons capables de pro-

duire une action chimique, que le chlorure d'argent et même le réactif si sensible de M. Daguerre ne sont nullement altérés par la lumière qu'il transmet. Le phosphore de Canton, préparé en calcinant des écailles d'huîtres avec du soufre, est si impressionnable, que le rayonnement d'une étincelle électrique ou l'exposition à la lumière diffuse, pendant une fraction de seconde, suffisent pour y développer une phosphorescence sensible, du moins quand on est resté long-temps dans l'obscurité; et cependant la lumière transmise par le verre bleu verdâtre, dont nous parlons, y produit à peine un effet appréciable. Un fait extrêmement remarquable, observé par M. Biot sur le phosphore de Canton, et par M. Malaguti sur le papier réactif de M. Daguerre (1642), c'est que la lumière transmise à travers une lame d'eau d'une certaine épaisseur est plus efficace que celle qui n'a rien traversé. Dans l'expérience de M. Malaguti la lame d'eau était épaisse de 9 millimètres; il y avait de plus une épaisseur de verre de 4 millimètres, la coloration cependant était environ d'un quart plus forte qu'à travers l'air seul. Dans les mêmes circonstances, l'alcool, l'éther sulfurique, le naphte, le deutochlorure d'étain, l'acide sulfurique laissent passer les rayons chimiques comme l'air, tandis que les acides chlorhydrique et azotique, le sulfure de carbone, l'essence de lavande les arrêtent plus ou moins. M. Biot a reconnu que l'effet sur le phosphore de Canton était moins marqué, à travers un verre blanc de 3 millimètres d'épaisseur, qu'à travers des lames de cristal de roche, de chaux sulfatée et de sel gemme épaisses de sept millimètres. On peut jusqu'à un certain point se rendre compte de ces faits et en particulier de l'action si singulière de l'eau, en admettant que certains rayons produisent des effets contraires, comme cela arrive avec la résine de gayac (1641); l'écran agirait en absorbant des rayons qui auraient neutralisé l'effet des autres. Quoi qu'il en soit, on voit que la propriété en vertu de laquelle certains rayons déterminent des actions chimiques, tient à une qualité particulière, et qu'elle ne dépend d'une manière absolue ni de la couleur ni de l'intensité de la lumière.

1658. Un grand nombre de phénomènes bien connus montrent combien l'épaisseur a d'influence sur l'absorption, Influence de l'épaisseur

sur l'absorption. et, par conséquent, sur la couleur transmise. Les verres et les liquides colorés en lames très minces finissent par devenir incolores; au contraire, le verre incolore prend une teinte verdâtre quand il est fort épais. Il en est de même d'une eau profonde, et l'air lui-même donne, comme on sait, une teinte rouge aux rayons du soleil couchant. Dans certains milieux, l'épaisseur change complétement la couleur de la lumière transmise. Ainsi les verres jaunes, en augmentant d'épaisseur, brunissent d'abord, puis passent au rouge; il en est de même de plusieurs liquides, comme l'eau-de-vie, l'infusion de safran, les chlorures de fer, d'or, etc. Le chlorure de chrôme, versé dans un verre conique, est d'un beau vert près du fond; ensuite, à mesure que l'épaisseur augmente, il devient de plus en plus foncé, jusqu'à ce que sa nuance se change en un brun douteux qui passe enfin au rouge de sang. Pour concevoir ces phénomènes, il faut observer que le jaune ou le vert donnés par une faible épaisseur sont des teintes composées dans lesquelles le prisme décèle du rouge, qui, résistant mieux à l'absorption, finit par dominer.

Influence de la chaleur. 1659. D'après les expériences de Brewster, la chaleur fait varier l'absorption. Ainsi un verre pourpre ayant été chauffé jusqu'au rouge, a laissé passer le vert et le jaune qu'il arrêtait auparavant; mais il a repris sa force primitive d'absorption à la température ordinaire. Un verre rouge sombre est devenu presque opaque par une forte chaleur; il a repris à peu près sa transparence par le refroidissement.

— de la lumière. Faraday a remarqué qu'un verre teint en pourpre par l'oxide de manganèse prenait une teinte beaucoup plus prononcée quand il avait été traversé par les rayons solaires, et que ce changement de nuance persistait.

Influence de l'absorption sur la couleur propre des corps. 1660. L'absorption n'altère pas seulement la couleur de la lumière transmise, elle altère aussi la lumière réfléchie; elle joue ainsi un rôle très important dans le phénomène des *couleurs propres* des corps. Pour concevoir son influence, observons d'abord que la réflexion de la lumière ne se fait pas seulement à la première surface; s'il en était ainsi, la couleur d'un corps ne dépendrait jamais de l'épaisseur, et on sait au contraire que dans une foule de cas la teinte change sensiblement à mesure que le corps devient plus mince. Ainsi les

verres colorés, réduits en poudre ou en fils très fins, ont une teinte beaucoup plus claire ; on sait que la peinture se fonce à mesure qu'on multiplie les couches, etc. D'après cela, et si nous nous rappelons qu'il n'y a pas de corps absolument opaque (1394), nous concevrons que les rayons réfléchis profondément doivent être plus ou moins altérés par l'absorption, de sorte que si la lumière incidente est blanche, la lumière réfléchie pourra très bien être colorée. En général, cette lumière réfléchie a la même couleur que la lumière transmise, avec une nuance plus ou moins foncée, comme on le voit pour les pierres précieuses, les verres, les liquides colorés, et la plupart des corps dits transparents. D'autres fois elle est différente ; c'est le cas de certains minéraux, comme l'opale, et de certains liquides qui n'ont qu'une transparence imparfaite ; par exemple, une décoction d'écorce de marronnier d'Inde paraît jaune par transmission, et violette ou bleue par réflexion. C'est surtout le cas des substances dites opaques : ainsi l'or transmet de la lumière bleue et réfléchit de la lumière jaune ; l'argent, qui réfléchit du blanc presque pur, transmet de la lumière verte. Cette différence s'explique, au moins en partie, par la différence de trajet des rayons réfléchis et des rayons transmis (1658).

Raies produites dans le spectre par les vapeurs colorées.

1661. Si on examine le spectre à travers un matras de verre, dans lequel on a mis un peu d'iode et qu'on chauffe peu à peu, on voit d'abord quelques traits noirs dans le violet et dans le bleu; leur nombre augmente à mesure que la vapeur devient plus dense ; bientôt ces deux couleurs sont absorbées, et de nouveaux traits noirs se montrent successivement dans le vert, le jaune et l'orangé ; enfin, de tout le spectre, il ne reste plus que le rouge, et encore est-il rempli de lignes noires. On observe des phénomènes analogues dans la vapeur de brôme et dans celle d'acide hyponitrique. On avait d'abord pensé, d'après cela, que les raies du spectre solaire pouvaient bien être dues à une absorption exercée par notre atmosphère ; mais on a abandonné cette opinion quand on a constaté que les raies ne changeaient pas avec l'épaisseur d'air traversée. Elles ne sont pas dues non plus à une absorption dans l'atmosphère du soleil, car, pendant une éclipse qui ne laissait voir que la lumière des

bords, où l'épaisseur est traversée nécessairement plus grande, M. Forbes a reconnu qu'il n'y avait aucun changement dans les raies.

M. Brewster a observé aussi des raies avec la sève verte des végétaux ; mais, d'après les expériences de M. Rudberg, il ne s'en forme pas avec les liquides colorés parfaitement homogènes.

Absorption par la vapeur d'eau.

1662. M. Forbes a constaté que la vapeur d'eau, avant tout commencement de condensation, était parfaitement transparente et sans couleur ; quand la condensation est arrivée à un certain terme, la vapeur laisse passer de la lumière rouge ; enfin, dans un troisième état, elle est opaque pour de grandes épaisseurs, et, avec des épaisseurs moindres, elle laisse passer la lumière blanche sans la colorer. De la vapeur enfermée dans un globe de verre présente ces trois états par de simples changements de température. Quand on analyse la lumière transmise, on trouve que l'absorption commence par le violet et l'indigo ; ensuite elle atteint le bleu ; avec encore plus d'épaisseur, elle affaiblit considérablement le jaune ; il ne reste à la fin qu'un rouge vif et un vert imparfait. Ces expériences montrent que les couleurs rouges de l'aurore et du soleil couchant peuvent être dues à la vapeur dans certaines conditions de précipitation. Quant aux rayons divergents rouges et bleus qu'on voit quelquefois long-temps après le coucher du soleil, ce n'est qu'un cas des rayons divergents ordinaires (1601), avec cette particularité, que les nuages ou les montagnes qui divisent la lumière en faisceaux se trouvent au-dessous de l'horizon ; le fond obscur du ciel qu'on voit entre les faisceaux rouges se colorant par contraste (1675), donne l'apparence des rayons bleus.

Couleur de l'aurore et du soleil couchant.

Rayons crépusculaires.

Couleur de lune éclipsée.

La couleur rouge sombre que prend la lune éclipsée est évidemment due à l'absorption qu'éprouvent les rayons du soleil en traversant notre atmosphère (1482).

§ III. *Composition et perception des couleurs.*

Combinaison des couleurs prismatiques.

1663. Avec les moyens que nous avons indiqués pour recomposer la lumière blanche (1627), on obtient une infinité de couleurs composées quand on supprime telle ou telle cou-

leur élémentaire. Soit, par exemple, une lentille L, rassemblant les rayons du spectre en F; avec un écran à coulisses A B, on pourra laisser passer seulement certains rayons et en telles quantités qu'on voudra. On trouve de cette manière que chaque couleur peut être imitée par le mélange des deux couleurs qui l'avoisinent. Ainsi on forme de l'orangé avec le rouge et le jaune, du vert avec le jaune et le bleu, du violet avec le bleu et le rouge, comme si les extrémités du spectre se touchaient; avec du rouge, du jaune et du bleu, on peut former du blanc. Du reste, toutes ces couleurs composées se résolvent dans leurs éléments quand on les regarde à travers un prisme. Fig. 445 Fig. 446

Coule complem taires.

1664. Deux couleurs sont dites complémentaires lorsqu'elles forment du blanc par leur combinaison. Les couleurs complémentaires sont toujours composées, car il est impossible de former du blanc avec deux couleurs élémentaires. Dans l'appareil précédent, la couleur qui se forme au foyer est évidemment complémentaire de la couleur que formeraient à eux seuls les rayons arrêtés; on a donc un moyen très simple de dresser un tableau de couleurs complémentaires. Si, par exemple, on intercepte le rouge, toutes les autres couleurs composeront une teinte verte; si une portion du spectre donne une teinte orangée, l'autre donnera du bleu; si le jaune domine dans une portion, le violet dominera dans l'autre. Ainsi, en négligeant les nuances, on aura pour couleurs complémentaires :

rouge et vert, orangé et bleu, jaune et violet.

Règle Newton p trouver couleurs co posées. Fig. 447

1665. On doit à Newton une règle empirique, généralement admise, avec laquelle on peut trouver d'avance la couleur que doit produire un mélange de couleurs simples, dont l'espèce et les proportions sont données. Divisez la circonférence d'un cercle en sept parties proportionnelles aux nombres :

$\frac{1}{6}$ $\frac{1}{16}$ $\frac{1}{10}$ $\frac{1}{9}$ $\frac{1}{10}$ $\frac{1}{16}$ $\frac{1}{9}$

rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet;

chacun de ces arcs représentera une couleur du spectre; marquez les centres de gravité, *r*, *o*, *i*, *v*, *b*, *i*, *u*, de chaque

arc, et supposez-en ces points des poids proportionnels à l'intensité de chaque couleur entrant dans le mélange proposé. Si, pour le rouge, par exemple, cette intensité est la moitié de celle qui existe dans le rouge du spectre, le poids en r sera $1/2$ de $1/9$, et ainsi des autres. Prenez ensuite le centre de gravité commun de tous les centres partiels; si ce point tombe en K dans le secteur jaune, c'est que la teinte cherchée est jaune; elle sera du jaune pur, si K est à égale distance des couleurs voisines; s'il est plus près du vert, le jaune tirera sur le vert; si K tombe entre le rouge et le violet, on a une teinte pourpre qui ne se trouve pas dans le spectre, et ce pourpre sera rougeâtre ou violacé, suivant la position de K.

Le rayon du cercle étant pris pour unité, la distance KM à la circonférence représente approximativement la proportion de blanc qu'il faudrait employer pour imiter à l'œil la teinte proposée, en mêlant le blanc avec la proportion CK de la couleur simple sur laquelle K est tombé. On voit d'après cela que la teinte est d'autant plus pâle que K est plus près du centre. S'il était au centre même, la teinte résultante se réduirait à du blanc. Observons qu'il n'y a pas deux centres de gravité sur le même diamètre, de sorte que la construction montre l'impossibilité de faire du blanc parfait avec deux couleurs simples, en quelque proportion qu'on les prenne; on arrive seulement à une teinte fort pâle. Il est à noter que dans le cercle les couleurs complémentaires sont diamétralement opposées, et que la construction de Newton faite à l'inspection seule donne des résultats d'une exactitude souvent suffisante.

Applications. 1666. La composition des teintes donne la clef d'un grand nombre de phénomènes d'optique que nous étudierons bientôt; elle fait concevoir les variations de couleur dans la lumière transmise par les milieux plus ou moins épais (1657). Ici nous indiquerons seulement, d'après M. Arago, l'explication naturelle qu'elle fournit des variétés de couleur offertes par la mer. Les navigateurs s'accordent à dire que la couleur propre de la mer est le bleu céleste plus ou moins foncé; mais cette couleur est quelquefois totalement changée dans les parages où l'eau est peu profonde, parce que la lumière réfléchie par le fond arrive confondue avec la lu-

Couleurs de la mer.

mière naturelle de l'eau. Ainsi un fond de sable jaune peu réfléchissant donne à la mer une teinte verte. Si le fond est d'un jaune éclatant, le bleu de l'eau verdit à peine cette vive lumière et la mer paraît jaune. Dans la baie de Loango les eaux sont fortement rougeâtres, on les dirait mêlées de sang; cette apparence est simplement due à un fond très rouge, comme on s'en est assuré. Lors même que le fond est blanc, la mer présente encore des nuances différentes, suivant la profondeur. Car le fond éclairé par de la lumière qui a traversé une épaisseur plus ou moins grande doit se colorer plus ou moins. On admet généralement que l'eau réfléchit de la lumière bleue et transmet de la lumière verte, le sable sera donc coloré en vert et les rayons qu'il émettra prenant une teinte encore plus foncée en traversant de nouveau le liquide, le vert pourra quelquefois prédominer sur le bleu. Quand la mer est agitée elle paraît souvent verte, parce que les vagues convenablement orientées laissent arriver à l'œil plus de lumière transmise que de lumière réfléchie; elles font en quelque sorte voir l'eau dans son épaisseur comme une lame de verre qu'on regarde par la tranche. Les ombres des nuages qui forment souvent de larges taches bien isolées sur la mer en changent notablement la teinte, qui d'ailleurs doit aussi dépendre de la couleur du ciel et du soleil.

Couleurs des peintres.

1667. Ce que nous venons de dire des couleurs considérées comme des espèces particulières de lumière ne s'applique pas rigoureusement aux couleurs employées par les peintres. D'abord celles-ci réfléchissent toujours différents rayons colorés; les teintes les plus pures du carmin, de l'outre-mer, de l'indigo se décomposent par le prisme. Une seconde différence, c'est que le mélange de plusieurs matières colorantes produit toujours une certaine proportion de noir, qui ternit plus ou moins la teinte résultante.

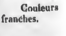


Couleurs simples.



Du reste les peintres, sans s'occuper de l'action du prisme, appellent *simples* les couleurs avec lesquelles ils peuvent composer toutes les autres; le rouge, le jaune et le bleu sont leurs couleurs simples. Ils appellent couleurs *franches* celles qui ne contiennent ni noir ni blanc; les couleurs mêlées de noir prennent le nom de couleurs *rabattues* ou *rompues*. Physiquement l'addition du noir consiste dans la destruction d'une partie de la lumière.

Couleurs franches.



Couleurs rabattues.



Perception de couleurs. Ton. Nuance. Gamme.

1668. Le *ton* d'une couleur est la modification qui résulte de l'addition du noir ou du blanc; la *nuance* est une modification provenant du mélange d'une autre couleur prise en petite quantité. On entend par *gamme* l'ensemble des tons d'une même couleur, les uns *dégradés* par du blanc, les autres *montés* par du noir. Le talent de distinguer et de classer les tons et les nuances ne s'acquiert que par une très longue habitude. Quant aux couleurs principales leur distinction est généralement regardée comme très facile, beaucoup plus par exemple que celle des notes de la musique.

Insensibilité pour certaines couleurs

1669. Il y a des individus insensibles à certaines couleurs, particulièrement au rouge; le physicien Dalton se trouvait dans ce cas; l'extrémité rouge du spectre n'était que du noir pour lui. Plusieurs personnes prennent aussi le bleu de Prusse et l'indigo pour du noir. Presque toujours cependant les couleurs auxquelles l'œil est insensible produisent au moins la sensation de la lumière. Ainsi les individus qui ne connaissent que le jaune et le bleu voient le spectre dans toute son étendue; seulement pour eux le rouge, l'orangé, le jaune et le vert ne sont que des nuances de jaune, et tout le reste est du bleu.

Liaison entre la couleur et la réfrangibilité.

1670. Nous ne chercherons pas ici en quoi consiste la propriété qu'ont certains rayons d'exciter en nous la sensation de telle ou telle couleur; nous remarquerons seulement qu'en général un rayon qui produit une couleur déterminée possède un degré déterminé de réfrangibilité : cela est évident par la disposition des couleurs dans le spectre. Cependant, si on descend dans les détails, on trouve des exceptions. Ainsi nous avons vu que deux rayons de couleur différente, comme le rouge et le jaune, pouvaient avoir la même réfrangibilité (1655) : cela s'accorde d'ailleurs avec les expériences de M. Melloni, où l'on voit des rayons de même réfrangibilité jouir de propriétés tout-à-fait distinctes, les uns donnant de la chaleur sans lumière et les autres de la lumière sans chaleur.

Elle n'est pas absolue.

Ce qui prouve encore que la couleur ne dépend pas toujours de la réfrangibilité, c'est que l'œil ne distingue pas les couleurs simples des couleurs composées, par exemple, le vert simple du vert formé de jaune et de bleu, quoique dans ces deux cas les rayons qui produisent la sensation aient des

réfrangibilités bien différentes. Enfin les phénomènes du contraste et beaucoup d'autres vont nous démontrer, tout-à-l'heure, que l'œil n'est pas tout-à-fait passif quand nous avons la sensation d'une couleur, de sorte que le jugement que nous portons dépend de l'état particulier dans lequel se constitue l'organe.

1671. D'après ce fait, que les sensations dans les deux yeux se superposent (1597), on conçoit qu'on devra voir du vert, par exemple, quand on regardera d'un œil à travers un verre bleu et de l'autre à travers un verre jaune. Cependant les couleurs se séparent si l'attention se porte plus spécialement sur l'une des sensations. Combinaison des couleurs vues avec les deux yeux.

1672. On appelle *couleurs accidentelles* les couleurs de *l'image accidentelle* (1615, 2°) qui succède à la contemplation d'un objet coloré. Les couleurs accidentelles sont complémentaires (1664) de celles de l'objet; cela montre qu'il y a la même opposition entre deux couleurs complémentaires qu'entre le noir et le blanc. Voilà pourquoi M. Chevreul a réuni ces deux cas sous le nom de *contraste successif*. Pour observer les couleurs accidentelles on n'a qu'à regarder pendant quelque temps une petite surface colorée, par exemple un pain à cacheter jaune posé sur un papier blanc, quand ensuite on l'enlève on voit un cercle violet à sa place; avec un pain à cacheter rouge l'image accidentelle serait d'un vert bleuâtre. Ces images, du reste, sont soumises aux lois que nous avons indiquées (1615). Couleurs accidentelles. Contraste successif.

1673. Les couleurs accidentelles se combinent entre elles à la manière des couleurs réelles, c'est-à-dire que du jaune et du bleu accidentel forment du vert, du rouge et du bleu accidentel forment du violet, etc. On peut s'en convaincre par l'expérience suivante, due au père Scherffer. On place, l'un à côté de l'autre, sur un fond noir, deux petits carrés de papiers colorés, l'un violet et l'autre orangé, couleurs dont les accidentelles sont le jaune et le bleu, et l'on marque d'un point noir le milieu de chacun de ces carrés. Alors on porte alternativement les yeux sur l'un et l'autre point, en les tenant fixés sur chacun d'eux pendant environ une seconde, et, après avoir répété cette opération un grand nombre de fois, on ferme les yeux et on les dirige vers une surface blanche. Bientôt il se manifeste l'apparence de trois Combinaison des couleurs accidentelles.

carrés juxta-posés, dont celui du milieu est évidemment formé par la superposition des couleurs accidentelles produites par les deux couleurs employées. Or ce carré du milieu est vert; il serait violet si les deux couleurs employées étaient le vert et l'orangé dont les accidentelles sont le rouge et le bleu. Un cas fait cependant exception, c'est celui où les deux couleurs sont complémentaires; alors au lieu de produire du blanc elles semblent ne donner lieu qu'à un effet d'obscurité.

Cas où elles sont complémentaires.

Ainsi lorsque les deux petits carrés de papier sont l'un vert et l'autre rouge, couleurs dont les accidentelles sont le rouge et le vert, le carré qui occupe le milieu dans l'image accidentelle paraît noirâtre si on le projette sur un fond blanc, et complétement noir si on se couvre les yeux.

Combinaison avec les couleurs réelles.

1674. Les couleurs accidentelles se combinent avec les couleurs réelles de la même manière que ces dernières entre elles, c'est-à-dire que du rouge accidentel et du bleu réel forment du violet, etc. Il est aisé de s'assurer de ce fait en projetant l'image accidentelle sur une surface peinte de la couleur avec laquelle on veut la combiner; ainsi, en projetant sur une feuille de papier bleu l'image accidentelle rouge provenant d'un objet vert, il en résulte l'apparence du violet. Si on projette l'image accidentelle rouge sur du rouge, la nuance se renforce; mais si on la projette sur du vert, au lieu d'avoir du blanc, on a une tache d'un gris foncé, comme si la sensation était en partie détruite à cet endroit de la surface. On retrouve donc ici la même exception que dans la combinaison de deux couleurs accidentelles complémentaires. On sait que quand on examine un grand nombre de pièces d'étoffe de même couleur, les dernières paraissent d'une mauvaise nuance, c'est tout-à-fait le même cas. Evidemment la couleur accidentelle se forme déjà pendant que l'on regarde, voilà pourquoi la teinte perd de sa vivacité quand on regarde pendant long-temps. Il n'y a pas seulement fatigue; il y a réaction en sens inverse, puisque dans l'obscurité la plus complète l'image accidentelle apparaît.

Auréoles accidentelles colorées.

1675. La sensation de la couleur complémentaire se développe aussi autour de l'image réelle pendant qu'on regarde l'objet; il en résulte une auréole accidentelle colorée (1619) qui constitue le phénomène du contraste simultané. Ainsi

Contraste simultané.

lorsque l'intérieur d'un appartement n'est éclairé que par la lumière du soleil transmise à travers un rideau coloré, et que ce rideau est percé d'un petit trou, si on reçoit le rayon solaire sur un papier blanc, on voit une tache vivement colorée d'une teinte complémentaire de celle du rideau. Le phénomène du contraste simultané s'observe quelquefois sur de larges surfaces, principalement quand sa lumière est faible.

On sait que les ombres produites sur un mur blanc au lever ou au coucher du soleil paraissent bleues ou vertes ; c'est qu'alors la lumière de cet astre est orangée ou rougeâtre, et que les ombres se teignent de la couleur complémentaire. Si un appartement où on allume des bougies est encore faiblement éclairé par la lumière du jour qui s'éteint, les ombres que produisent les corps interposés entre les bougies et les objets blancs paraissent bleues par la même raison. Ombres colorées.

1676. On conçoit qu'à cause du développement des auréoles accidentelles, deux couleurs voisines doivent s'influencer réciproquement. Voici d'ailleurs une expérience de M. Chevreul qui rend cette influence facile à observer. On colle l'une contre l'autre, sur une carte, deux bandes de papier ou d'étoffe teintes des deux couleurs que l'on veut soumettre à l'observation ; l'une est par exemple rouge et l'autre jaune ; ces bandes ont 12 millim. de largeur et 6 centim. de longueur. Ensuite on colle parallèlement à l'une de ces bandes et à la distance d'un millim. une seconde bande qui lui soit identique en dimension et en couleur, elle est destinée à servir de terme de comparaison ; on fait la même opération relativement à la bande peinte de l'autre couleur, et l'on a ainsi quatre bandes colorées, deux d'une couleur et deux de l'autre ; les deux intérieures se touchent, et c'est sur elles que l'on observe l'action mutuelle des deux couleurs. Il suffit pour cela de regarder la carte dans un certain sens et pendant quelques secondes. L'effet réciproque des deux couleurs contiguës devient alors très sensible. Ainsi avec des bandes rouges et jaunes on remarquera que la bande rouge intérieure tirera sur le violet, et que la bande jaune qui lui est contiguë tirera sur le vert. Influence de deux couleurs voisines.

1677. Par des expériences de ce genre M. Chevreul est Lois du con-

traste simultané.

arrivé aux résultats suivants qu'on peut appeler *les lois du contraste simultané* :

1° Si les deux couleurs voisines sont complémentaires l'une de l'autre comme le rouge et le vert, elles acquièrent par leur juxta position un éclat et une pureté remarquables.

2° Si l'on juxta-pose une couleur quelconque avec le blanc, ce dernier se teint légèrement de la couleur complémentaire, et la couleur employée devient plus brillante et plus foncée : ainsi, par le contact du blanc et du rouge, le premier devient verdâtre, et le second semble plus brillant et plus foncé.

3° Si l'on juxta-pose une couleur quelconque avec le noir, celui-ci prend également d'une manière plus ou moins prononcée la teinte complémentaire de la couleur employée, et cette dernière paraît en général plus brillante et plus claire.

4° Les modifications mutuelles des couleurs ne sont pas bornées au cas où les objets colorés sont contigus ; on peut encore les rendre sensibles, même lorsque la distance est de 5 centimètres ; seulement l'intensité de l'effet est d'autant moindre que la distance est plus grande.

Applications.

1678. Il est évident que ces lois doivent recevoir des applications nombreuses dans les arts où il s'agit d'assortir des couleurs. Aussi M. Chevreul observe qu'on ne doit jamais assortir pour les meubles des étoffes rouges avec l'acajou, car la teinte complémentaire verdâtre qu'elles développent fait disparaître la couleur rougeâtre qui donne du prix à l'acajou, de sorte que celui-ci ressemble alors à du chêne ou à du noyer. Lorsqu'on imprime des dessins sur des étoffes ou des papiers colorés, la couleur de ces dessins est ordinairement modifiée par la complémentaire de celle du fond, et il en résulte quelquefois des discussions avec les imprimeurs parce que ces dessins ne paraissent pas de la couleur qu'on avait demandée. Dans ce cas, pour bien juger de la nuance, il suffirait de couvrir le fond avec un morceau de papier blanc découpé.

Contraste d'un œil à l'autre.

1679. Pour terminer ce qui regarde le contraste simultané, nous indiquerons une expérience due au docteur Smith, où le contraste a lieu d'un œil à l'autre. Si on fait tomber latéralement une forte lumière sur l'un des yeux seulement, tandis qu'on regarde une bandelette étroite de papier blanc,

de manière à la voir double, l'image paraît verdâtre dans l'œil frappé par la lumière, et rougeâtre dans l'autre. Une bougie mise très près de l'œil, mais hors de l'axe optique, le jour d'une fenêtre ou le soleil produisent très bien cet effet, il n'est pas nécessaire que la lumière pénètre par la pupille, il suffit qu'elle touche sur les paupières. Pour expliquer ce phénomène, M. Plateau observe que la lumière pénétrant à travers les enveloppes de l'œil répand sur la rétine une clarté rougeâtre, d'où il suit que l'image blanche se teint de la couleur complémentaire; en même temps par un double contraste les apparences sont précisément inverses dans l'autre œil.

§ IV. *De la dispersion dans les différents milieux et de l'achromatisme.*

1680. Quand nous nous sommes occupés de la dispersion (1623), c'était seulement pour séparer les différentes couleurs dont la lumière se compose; maintenant nous allons reprendre ce phénomène pour l'étudier dans les différents milieux. Le moyen le plus direct pour cela est évidemment de mesurer dans chaque milieu l'indice de réfraction de chacun des rayons que sépare le prisme. On y parvient à l'aide du procédé général (1498); les raies du spectre fournissent des repères pour opérer sur des rayons bien déterminés. Ainsi on place le prisme de manière à avoir la déviation minima pour la raie B, par exemple, qu'on fait tomber à la croisée des fils de la lunette d'un théodolite; on dirige ensuite la lunette vers la ligne lumineuse, et l'angle des deux positions donne la déviation à l'aide d'une légère correction, si la ligne n'est pas très éloignée. L'angle des prismes étant connu, on a tout ce qu'il faut pour calculer l'indice du rayon contigu à la raie. Voici quelques résultats obtenus par Fraunhofer : Indices de réfraction des différents rayons dans les différents milieux.

SUBSTANCES.	INDICE DE RÉFRACTION DES RAYONS VOISINS DES RAIES						
	B (rouge.)	C (rouge.)	D (orangé.)	E (vert.)	F (bleu.)	G (indigo.)	H (violet.)
Eau..............	1,3309	1,3317	1,3336	1,3359	1,3378	1,3413	1,3442
Huile de térébenth.	1,4705	1,4715	1,4744	1,4784	1,4817	1,4882	1,49 9
Crown-glass......	1,5258	1,5268	1,5296	1,5330	1,5361	1,5417	1,5466
Flint glass........	1,6277	1,6297	1,6350	1,6420	1,6483	1,6603	1,6711

Les indices donnés pour la lumière blanche (1501) ne sont que des résultats moyens; ils coïncident avec les indices des rayons verts qui occupent la partie moyenne du spectre.

Vitesse des différentes couleurs.

1681. On conçoit que si la lumière rouge, par exemple, se propageait plus vite que les autres lumières colorées, les satellites de Jupiter devraient d'abord nous paraître rouges au moment de leur émersion; car la distance étant de plus de 100 millions de lieues, une très légère différence de vitesse suffirait pour produire un effet appréciable; mais comme la première lumière qui nous arrive est toujours blanche, nous pouvons conclure que les rayons de couleur différente ont la même vitesse dans les espaces célestes, c'est-à-dire dans le vide. L'épaisseur de l'atmosphère est trop petite pour que la conclusion puisse s'appliquer rigoureusement à l'air; et, en effet, d'autres expériences (1735) prouvent qu'il y a dans l'air de légères différences de vitesse; mais elles sont si faibles, qu'on peut les négliger, en comparaison de celles qu'on observe dans les liquides et les solides. Nous savons aussi que la vitesse dans l'air diffère extrêmement peu de la vitesse dans le vide (1501, 1502); d'après cela, si nous prenons pour unité la vitesse dans le vide, nous avons, d'après le tableau précédent, $\frac{1}{1,3309}$ et $\frac{1}{1,3441}$ pour les vitesses du rouge et du violet dans l'eau. On voit que celle du rouge est plus grande; en comparant les autres rayons, on reconnaît que la vitesse est d'autant plus petite que l'on considère des rayons plus réfrangibles; ce résultat d'ailleurs se vérifie pour tous les milieux.

Les rapports de déviation changent d'un milieu à l'autre.

1682. Newton croyait que les déviations des différents rayons conservaient le même rapport dans les différents milieux, c'est-à-dire qu'on avait $d : d' :: \mathrm{d} : \mathrm{d}'$, en désignant pour deux couleurs les déviations par d, d' dans un milieu, et par d, d' dans un autre; mais cette proportion n'a pas lieu, même quand les angles sont infiniment petits. Dans ce dernier cas, la valeur générale de la déviation $i-r$ (1470) se réduit à $i\left(\frac{n-1}{n}\right)$, de sorte qu'on peut s'assurer du défaut de proportionnalité par un calcul très facile; mais nous verrons bientôt une table toute calculée qui conduit au même résultat.

1683. Dans les recherches d'optique, la dispersion qu'on a surtout besoin de connaître, est celle qui résulte de deux réfractions, comme quand la lumière traverse un prisme ou une lentille. A la rigueur, pour bien connaître cette dispersion, il faudrait suivre la marche des différents rayons après leur sortie; mais d'ordinaire on s'occupe seulement des rayons extrêmes, et on prend pour mesure de la dispersion l'angle de ces rayons, ou, ce qui revient au même, la longueur du spectre à l'unité de distance, l'angle étant assez petit pour que la corde se confonde avec l'arc; la longueur est d'ailleurs mesurée sur un plan perpendiculaire aux rayons moyens. Mesure de la dispersion prismatique.

1684. Il est facile de s'assurer par la longueur du spectre que la grandeur de la dispersion dépend : Causes qui influent sur la dispersion.

1° De l'angle du prisme; il suffit pour cela d'opérer avec le prisme à angle variable (1495), ou avec un prisme de verre dont les angles sont différents.

2° De la position du prisme; si on part de la position newtonienne (1493), on voit le spectre s'allonger considérablement à mesure que le rayon incident se rapproche du sommet du prisme; au contraire la longueur varie à peine quand le rayon se rapproche de la base, de sorte que pour une même déviation du rayon moyen la dispersion est beaucoup plus forte quand le rayon incident est du côté du sommet que quand il est du côté de la base.

3° De la nature du prisme; c'est ce que prouvent les tables de dispersion (1687) et des expériences qu'on peut aisément faire avec le polyprisme et le prisme à compartiments (1496).

1685. Quand l'angle du prisme est petit et qu'on s'écarte peu de la déviation *minima*, la mesure de la dispersion devient très simple. Soit n_r l'indice des rayons rouges, leur déviation sera $a(n_r-1)$ (1494) et $a(n_v-1)$ sera celle des rayons violets. Or la différence des angles de déviation est évidemment l'angle des rayons ou la mesure de la dispersion (1683), qui se réduit ainsi à $a(n_v-n_r)$. En général la différence $N-n$ de deux indices s'appelle *coefficient de dispersion*; c'est, comme on voit, l'angle de dispersion pour un prisme d'un degré. On appelle encore plus particulièrement coefficient de dispersion la différence n_v-n_r des indices extrêmes. Il est évident que dans ce cas les coefficients de disper- Mesure approchée de la dispersion. Coefficient de dispersion.

sion des différentes substances représentent les longueurs relatives des spectres donnés par des prismes de même angle, cet angle étant toujours supposé très petit.

Pouvoir dispersif.

1686. Si avec les différentes substances on formait des prismes d'angles tels que la déviation *minima* fût la même pour tous; ces prismes donneraient des spectres de différentes longueurs rangés les uns à côté des autres avec le vert sur la même ligne, et en comparant les longueurs de ces spectres on aurait une nouvelle mesure de la dispersion. Or il est aisé de calculer ces longueurs quand on connaît les indices des rayons extrêmes. Soient $a\,(n_v - n_r)$ et $a'(n'_v - n'_r)$ les longueurs des deux spectres; la déviation des rayons moyens étant la même, on a $a\,(n-1) = a'(n'-1)$; avec la valeur de a' tirée de cette équation, on trouve que les longueurs des spectres sont entre elles $:: \frac{n_v - n_r}{n - 1} : \frac{n'_v - n'_r}{n' - 1}$.

La différence des indices extrêmes divisée par l'indice moyen diminué de l'unité s'appelle *pouvoir dispersif*. Les pouvoirs dispersifs sont tout simplement les longueurs relatives des spectres pour le cas où la déviation des rayons moyens est la même.

En définitive, la mesure de la dispersion revient toujours, comme on le voit, à la mesure des indices de réfraction.

1687. *Tables de dispersion.*

NOMS DES SUBSTANCES.	Pouvoir dispersif ou Longueur du spectre à déviation égale.	Coefficient de dispersion ou Longueur du spectre à angle égal.
Chromate de plomb.	0,400	0,770
Huile de casse.	0,139	0,089
Soufre.	0,130	0,149
Phosphore.	0,128	0,156
Sulfure de carbone.	0,115	0,077
Sel gemme.	0,053	0,029
Flint-glass.	0,052	0,032
Acide nitrique.	0,045	0,019
Huile de térébenthine.	0,042	0,020
Rubis spinelle.	0,040	0,031
Diamant.	0,038	0,056
Huile d'olive.	0,038	0,018
Béril.	0,037	0,022
Blanc d'œuf.	0,037	0,013
Éther sulfurique.	0,037	0,012
Alun.	0,036	0,017
Eau.	0,035	0,012
Grenat.	0,033	0,027
Crown-glass.	0,033	0,018
Acide sulfurique.	0,031	0,014
Borax.	0,030	0,014
Alcool.	0,029	0,011
Tourmaline.	0,028	0,019
Saphir bleu.	0,026	0,025
Émeraude.	0,026	0,015
Cristal de roche.	0,026	0,014
Spath fluor.	0,022	0,010

1688. M. Brewster, à qui l'on doit ces résultats, prévient que les mesures ont été prises à la lumière ordinaire du jour; avec celle du soleil le rouge et le violet paraîtraient plus étendus, de sorte que la dispersion serait plus forte; ainsi pour le flint par exemple le coefficient serait 0,043 (1680) au lieu de 0,032. D'après les expériences de M. Biot, la dispersion du sulfure de carbone n'est pas seulement 5 fois, mais environ dix fois aussi grande que celle de l'eau. **Remarques.**

Quoi qu'il en soit, le tableau montre que les milieux où entrent des métaux et des substances combustibles produisent en général une très forte dispersion. La densité contribue aussi à la dispersion; voilà sans doute pourquoi celle-ci est faible dans l'éther et l'alcool, malgré leur combustibilité.

L'état solide ou liquide paraît avoir peu d'influence. Quant au gaz, leur dispersion est si faible qu'il faut recourir à des moyens indirects pour l'étudier. D'après les expériences de M. Barlow sur le sulfure de carbone, la chaleur augmente la dispersion d'une petite quantité. Il est à remarquer qu'elle diminue la réfraction des liquides même quand la densité augmente, c'est du moins ce qui résulte des expériences de M. Arago sur l'eau dans le voisinage de son maximum de densité. Si on se reporte à la table de réfraction (1501) on reconnaît qu'en général les substances qui dévient le plus la lumière, sont aussi celles qui la dispersent le plus. Mais il y a des exceptions; ainsi l'acide chlorhydrique, l'huile essentielle de térébenthine dispersent plus que le crown et cependant réfractent moins. Le tableau met bien en évidence l'erreur de Newton (1682), car, ainsi qu'on peut s'en assurer par un petit calcul, cette erreur revient à dire que la dispersion prismatique est proportionnelle à la déviation moyenne, et que par conséquent elle est la même pour une même déviation. Or, si cela était, les pouvoirs dispersifs de toutes les substances seraient égaux puisque le pouvoir dispersif n'est en définitive que l'angle de dispersion pour une même réfraction moyenne. Il y a cependant quelques substances qui donnent des spectres de même longueur avec la même réfraction moyenne, comme on le voit dans la table; ce fait est surtout remarquable, quand à angle égal il y a une grande différence de dispersion. M. Brewster cite certains échantillons de crown dont le pouvoir dispersif est égal à celui du diamant; à angle égal, le spectre de crown est trois fois plus petit; mais comme en même temps la déviation est justement trois fois plus petite, il en résulte que quand on triple l'angle du crown, on obtient à la fois la même déviation et la même longueur dans le spectre.

Irrationalité de la dispersion prismatique.

1689. Puisqu'en général il n'y a pas de proportion entre les déviations des divers rayons considérés dans des milieux différents, on prévoit qu'il ne doit pas y en avoir non plus entre les espaces colorés des spectres produits par des prismes de matière différente; et en effet ces espaces sont en général inégaux pour des spectres de longueur égale. Qu'on forme deux spectres égaux, l'un au moyen de l'huile de casse et l'autre au moyen de l'acide sulfurique; on trouvera

que le rouge, l'orangé et le jaune occupent moins d'espace dans le premier que dans le second; le contraire a lieu pour les rayons bleus, indigo et violets. Le docteur Brewster a rangé les substances suivantes d'après le degré auquel les espaces colorés par les rayons les plus réfrangibles se trouvent dilatés.

Huile de casse.	Crown-glass.
Sulfure de carbone.	Alcool.
Huile de térébenthine.	Éther.
Diamant.	Acide nitrique.
Flint-glass.	Cristal de roche.
Huile d'olive.	Eau.
Sel gemme.	Acide sulfurique.

On voit, par cette table, qu'en général plus un milieu est réfringent, plus la partie bleue dans le spectre a d'étendue par rapport au rouge.

1690. Quand on expose une lentille ordinaire au soleil, le cercle lumineux qu'on reçoit sur un papier est toujours coloré sur le bord; avec une lentille convergente le bord est rouge tant que le papier n'a pas dépassé le foyer; au-delà du foyer le bord est bleu et violet. Cela résulte évidemment de ce que la lentille décompose la lumière, comme le ferait un prisme (1522). Il est clair, d'après cela, que les différents rayons ne concourent pas vers le même point; leur dispersion, dans ce cas, constitue l'*aberration de réfrangibilité*. A la rigueur il y a un foyer pour chaque couleur, celui des rayons violets est le plus voisin de la lentille, puisque ces rayons sont les plus réfrangibles; celui des rayons rouges est au contraire le plus éloigné. La distance *v r* des foyers extrêmes sert de mesure à l'aberration; pour une lentille de crown, cette distance forme environ la vingt-huitième partie de la distance focale moyenne qui répond aux rayons verts. Aberration de réfrangibilité des lentilles. Fig. 448.

1691. C'est l'aberration de réfrangibilité qui produit les franges irisées qu'on observe autour des images données par les lentilles. Soit A B un objet; si nous le supposons violet une lentille L en donnera une image violette V V; s'il est rouge on aura une image rouge R R située plus loin, et par conséquent plus grande, car du centre optique elle soutend le même angle (1531); si l'objet est blanc on aura ces deux Iris autour des images. Fig. 449.

images à la fois, et une série d'autres intermédiaires. Pour l'œil placé en O, les images se superposeront, et n'en feront qu'une plus ou moins confuse, qui paraîtra blanche dans l'angle V O V, tandis que sonc ontour présentera toutes les nuances, depuis le violet jusqu'au rouge qui sera en dehors.

Achromatisme. 1692. L'étude que nous venons de faire de la dispersion, dans les différents milieux, nous permettra de concevoir comment, en détruisant les dispersions les unes par les autres, on arrive à dévier la lumière par la réfraction sans la décomposer; c'est en cela que consiste l'*achromatisme*.

Prisme achromatique. Fig. 450. Imaginons un prisme A de crown dont l'angle soit de 1°; la déviation D A R du rayon rouge sera de 52 centièmes de degré (1494, 1680); soit ensuite un prisme F de flint d'un demi-degré tourné en sens inverse; le rayon rouge y éprouvera une déviation d R R′ de 0°,31, de sorte que sa direction formera, en définitive, un angle de 0°,21 avec la direction primitive S A. Pour le rayon violet la déviation D A V dans le crown sera 0°,54, et celle $d\,v\,v'$ dans le flint de 0°,33, en admettant 1,66 pour l'indice de réfraction. On aura donc encore 0°,21 pour la différence, c'est-à-dire pour l'angle avec la direction primitive S A; par conséquent les rayons rouges et violets seront parallèles. Or le faisceau incident ayant une certaine largeur, un rayon S′ A′ donnera un rayon violet A′ R qui émergera suivant R R′, et la lumière rouge sera recomposée avec la lumière violette suivant cette direction. Comme les prismes sont ordinairement en contact, c'est seulement vers l'extrême bord que ne peut pas se faire cette recomposition par des couleurs empruntées d'un rayon à l'autre.

Il est vrai qu'à cause de l'irrationalité de la dispersion la coïncidence des rayons extrêmes du spectre n'entraîne pas mathématiquement celle des rayons intermédiaires, comme dans le cas d'un seul milieu (1628); de sorte qu'au lieu de lumière blanche on a ce qu'on appelle un *spectre secondaire*; mais les couleurs sont extrêmement resserrées, et même elles deviennent presque insensibles quand on taille les prismes de manière à faire coïncider, non pas les rayons extrêmes, mais les rayons orangés et bleus, voisins des raies D et F. Avec trois prismes on pourrait faire coïncider trois rayons, mais l'avantage n'est pas proportionné à la difficulté

de l'exécution, du moins quand on en vient aux lentilles. D'après les recherches du Dr. Blair il existerait certains milieux inégalement réfringents, dans lesquels cependant les déviations des divers rayons seraient proportionnelles, de sorte qu'avec des prismes inégaux on pourrait avoir des spectres égaux et identiques, et par conséquent un achromatisme parfait en opposant les angles. Le Dr. Blair a cité le crown avec l'acide chlorhydrique, ou des solutions de chlorure d'antimoine et de mercure; mais les expériences n'ont pas été suffisamment répétées.

1693. En généralisant l'exemple précédent on reconnaît que, pour obtenir l'achromatisme, tout se réduit à rendre certains rayons parallèles à leur sortie du second prisme; dès qu'on obtient leur parallélisme, c'est comme si on obtenait leur coïncidence, à cause de la superposition des couleurs appartenant à différents rayons; et la coïncidence exacte de deux rayons bien choisis entraîne la coïncidence sensible de tous les autres. D'après cela, soient a, a' les angles des prismes, n, N, n', N$'$ les indices des rayons dont on veut obtenir la coïncidence, il est clair qu'on aura le parallélisme demandé si les angles définitifs de déviation sont les mêmes, ce qui fournit l'équation *Condition de l'achromatisme.*

$$a(n-1)-a'(n'-1)=a(N-1)-a'(N'-1)\ (1)$$

d'où $a'=\dfrac{N-n}{N'-n'}a$. Cette formule donne l'angle a' de flint capable d'achromatiser un angle a de crown; avec les échantillons de la table (1680), en prenant les indices des raies D et F, on aurait sensiblement $a'=1/2\ a$.

L'équation (1) peut prendre les deux formes

$$a(N-n)=a'(N'-n') \text{ et } a : a' :: N'-n' : N-n.$$

La première montre que, pour l'achromatisme, *les dispersions doivent être égales* (1685), c'est-à-dire que les prismes doivent donner des spectres de même longueur (en supposant qu'on veuille faire coïncider les rayons extrêmes); la deuxième exprime que *les angles des prismes doivent être en raison inverse des coefficients de dispersion.* Ainsi,

en prenant par approximation les résultats de la table du n° 1687, on trouve que, pour achromatiser le cristal de roche par le flint, il faut que l'angle du flint soit à celui du cristal :: 7 : 16; la même table donnerait le rapport de 9 : 16 pour les angles d'un prisme achromatique de flint et de crown. Il est évident que la substance la plus dispersive a toujours l'angle le plus petit, et que la différence des angles augmente à mesure qu'on prend des substances qui diffèrent davantage en dispersion. Le verre, par exemple, combiné avec le diamant, devrait avoir un angle trois fois aussi grand.

Déviation donnée par un prisme achromatique. 1694. La déviation donnée par un prisme achromatique est évidemment la différence $a\,(n-1) - a'\,(n'-1)$ des déviations produites par les prismes composants. Dans notre premier exemple (1692) cette déviation se trouve être $a\left(0{,}533 - \frac{0{,}642}{2}\right) = 0{,}212.\ a$, ou environ la cinquième partie de l'angle du crown. Si on désigne par p et p' les pouvoirs dispersifs, l'expression générale de la déviation donnée par un prisme achromatique pourra se mettre sous la forme

$$a\left(n-1\right)\left(1-\frac{p}{p'}\right)$$

On voit que pour obtenir une forte déviation il faut prendre des substances qui diffèrent beaucoup en pouvoir dispersif, et que, de plus, le milieu le moins dispersif doit être le plus réfringent possible. Le cristal de roche, par exemple, pour cette double raison, serait préférable au crown (1687); en achromatisant avec le flint des prismes égaux de ces deux substances, les déviations seraient :: 27 : 17 ou à peu près :: 3 : 2. Le diamant avec le flint donne une déviation encore plus forte, elle est à celle du crown :: 39 : 17, c'est-à-dire plus que double.

Remarque. La formule fait voir que quand les pouvoirs dispersifs sont égaux, la déviation devient nulle (1688); c'est le cas de certains échantillons de crown et de diamant; ces substances par conséquent ne conviendraient pas pour former des prismes achromatiques.

Moyen pra- 1695. Nous avons supposé jusqu'ici qu'on se servait des

tables de dispersion pour tout ce qui regardait l'achromatisme ; mais fussent-elles parfaitement exactes, ces tables ne donneraient en général qu'une première approximation, parce qu'il y a presque toujours des différences dans les échantillons des substances que l'on emploie. Aussi est-ce par l'expérience qu'en définitive on résout la question. Tout se réduit, comme nous savons, à trouver le rapport des angles réfringents capables de dévier la lumière sans la décomposer. On ne pourrait pas chercher ce rapport en taillant et en retaillant les prismes ; ce serait un tâtonnement impraticable. Au lieu de cela, on a deux pièces des substances à essayer (ce sont ordinairement des prismes) que l'on tourne ou que l'on incline jusqu'à ce qu'on obtienne l'achromatisme en regardant à travers. Des cercles divisés font reconnaître leur position, et le calcul donne ensuite le rapport cherché. Les appareils employés dans cette recherche s'appellent en général *diasporamètres*, ce qui signifie mesureurs de la dispersion. Celui de Rochon est assez connu, mais nous en indiquerons plutôt un autre que l'on doit à M. Biot. A l'extrêmité d'une lunette achromatique on fixe deux tiges T T percées de trous A dans lesquels passent les axes de deux châssis en cuivre CC qui peuvent ainsi tourner perpendiculairement à l'axe de la lunette ; leurs mouvements sont mesurés par des cercles gradués. Sur ces châssis on attache les prismes dont les angles doivent être déjà près de former un système achromatique, ce que l'on obtient à l'aide des tables, et par quelques essais préalables. Nous savons que la dispersion produite par chacun de ces prismes varie avec sa position (1684, 2°) ; on profite de cette variation pour chercher par tâtonnement la position précise où la compensation est la plus parfaite, pendant qu'on regarde avec la lunette une bande de papier blanc, placée à une grande distance sur un fond noir. Ensuite, d'après les angles et les inclinaisons actuelles des prismes, on calcule le rapport que devraient avoir les angles réfringents, pour que l'achromatisme restât aussi parfait, les prismes étant superposés et exposés perpendiculairement aux rayons lumineux.

tique d'optenir l'achromatisme.

Diasporamètre.

Fig. 451.

1696. Quand on connaît les angles des prismes qui donnent l'achromatisme et la dispersion d'une des substances employées, il est aisé de calculer celle de l'autre, puisque

Mesure approchée de la dispersion.

les angles sont en raison inverse des coefficients de dispersion (1693). Ainsi le procédé que nous venons d'indiquer pour obtenir l'achromatisme peut servir à mesurer la dispersion.

Lentilles achromatiques.

Fig. 452.

1697. D'après ce que nous venons de dire des prismes achromatiques, on concevra facilement comment on peut faire des lentilles qui donnent des images nettes et sans iris (1691). On combine pour cela une lentille convergente de crown C avec une lentille divergente de flint F; chaque prisme élémentaire (1522) étant alors achromatique, la lentille l'est aussi. Afin de montrer comment on calcule les courbures qui donnent l'achromatisme, supposons que l'angle du crown doive être double de l'angle du flint, et ne prenons pour simplifier que des lentilles ayant une face plane. L'angle du crown à une distance quelconque ML de l'axe sera $\frac{ML}{r}$, r étant le rayon de courbure (1523); l'angle correspondant du flint sera $\frac{ML}{r'}$; on doit avoir, disons-nous, $\frac{ML}{r} = 2\frac{ML}{r'}$; or cette condition se réduit à $r' = 2r$, c'est-à-dire que le rayon de courbure de la lentille de flint doit être double. En général, F étant le foyer d'une lentille, l'angle élémentaire à une distance M L de l'axe sera $\frac{ML}{(n-1)F}$; pour l'achromatisme il faudra qu'on ait (1693) :

$$\frac{ML}{(n-1)F} : \frac{ML}{(n'-1)F'} :: N'-n' : N-n \text{ ou } F : F' :: \frac{N-n}{n-1} : \frac{N'-n'}{n'-1}$$

c'est-à dire que les foyers doivent être proportionnels aux pouvoirs dispersifs : si par exemple celui du crown est à celui du flint :: 3 : 5, pour une lentille convergente de crown de 30 centimètres de foyer il faudra prendre une lentille divergente de flint ayant 50 centimètres de longueur focale. Comme les mêmes foyers peuvent être obtenus par différentes courbures, on choisit celles qui détruisent en même temps l'aberration de sphéricité (1526). La lentille de crown est du côté de l'objet; on la reconnaît aisément à ce qu'elle est convergente; d'ailleurs le crown a une teinte verdâtre.

1698. Les longueurs façales des deux lentilles étant évidemment en raison inverse des déviations produites par les prismes élémentaires, situés à égal distance de l'axe, il s'ensuit que le foyer d'une lentille achromatique est égal à $\frac{p'}{p'-p}$. F, F étant foyer de la lentille simple convergente, et p, p' les pouvoirs dispersifs des substances employées (1694). On voit que ce foyer, toujours plus long que celui de la lentille simple, s'en écarte d'autant moins qu'il y a plus de différence entre les pouvoirs dispersifs. D'après le même principe, on trouve que des lentilles toutes pareilles de crown, de cristal de roche et de diamant achromatisées par du flint ont des foyers qui sont entre eux :: 39 : 27 : 17 (1694) et que par conséquent les grossissements sont :: 17 : 27 : 39 (1533) ou à peu près :: 2 : 3 : 4. C'est à cause de cet avantage que dans ces derniers temps on a travaillé pour les microscopes des lentilles de diamant; le saphir donne à peu près le même grossissement. — Calcul du foyer d'une lentille achromatique. Applications.

1699. Lors même que l'objectif d'une lunette serait parfaitement achromatique, l'oculaire s'il était simple pourrait encore colorer l'image comme cela arrive avec un objet; de là la nécessité des oculaires achromatiques. Ceux qu'on emploie généralement ne sont pas formés de flint et de crown; ils se composent seulement de deux lentilles convergentes de crown, choisies et placés de telle sorte qu'elles corrigent en même temps l'achromatisme toujours un peu imparfait de l'objectif. On conçoit que les franges colorées qui résultent des images multiples (1691) disparaîtraient si les grandeurs de ces images étaient exactement proportionnelles à leurs distances à l'œil comme le représente la figure 453; car alors celui-ci voyant tous leurs bords suivant une même ligne droite, recevrait à la fois toutes les espèces de rayons. Tel est en définitive la manière dont les oculaires composés (1553) produisent l'achromatisme. — Oculaires achromatiques. Fig. 453.

1700. En général à l'œil nu nous n'apercevons pas de franges colorées sur le contour des objets, mais cela tient à l'étroitesse de ces franges qui est une conséquence nécessaire de l'étroitesse de la pupille et surtout de la petitesse de l'organe. Il est certain que l'aberration de réfrangibilité subsiste pour l'œil; on en a une preuve directe en regar- — L'œil n'est pas achromatique.

dant avec un prisme un trou d'épingle dans une carte placée devant une lampe; le spectre parait alors rétréci du côté du violet et élargi du côté du rouge, parce que les rayons les plus réfrangibles sont rassemblés par l'œil plus exactement que les autres. Pour les myopes à une certaine distance les rayons rouges sont réunis et les violets sont dispersés; on a le même phénomène avec un verre convergent; ainsi il est certain que l'œil a différents foyers pour les différents rayons, ce qui est le caractère des appareils non achromatiques. D'ailleurs dans certaines circonstances il se manifeste des franges colorées autour des objets, par exemple, quand avec le doigt ou le bord d'une carte on cache la plus grande partie de la pupille; pendant qu'on regarde de loin un barreau de fenêtre, celui-ci paraît bordé de bleu d'un côté et de jaune de l'autre, comme si on le regardait à travers un prisme d'un très petit angle, tel que le bord d'un verre de bésicles. L'œil de même qu'une lentille peut se décomposer en prismes; quand on ne laisse à découvert qu'une partie de la pupille, les choses se passent comme si on isolait un de ces prismes, et on voit que ce prisme isolé n'est pas achromatique.

Histoire de l'achromatisme.

1701. L'invention des instruments achromatiques est d'une date assez récente. Euler en 1747 donna le premier des formules pour leur construction; ces formules supposaient l'inégalité des pouvoirs dispersifs (1688); Dollond, opticien anglais, objecta l'autorité de Newton qui admettait l'égalité de ces pouvoirs; mais Klingenstierna, professeur à Upsal, fit voir que Newton avait à tort conclu cette égalité de ses expériences. Alors Dollond ne craignit plus de se livrer à des essais, et en 1757 il avait déjà construit plusieurs prismes et objectifs achromatiques. En 1767 son fils présenta à la société royale de Londres une lunette de 3 pieds 1/2 de foyer et de 3 pouces 1/2 d'ouverture donnant un grossissement de 150 fois, de sorte qu'elle équivalait à une lunette de 60 pieds. Les Dollond ont fait depuis un grand nombre de lunettes à peu près de même dimension qui sont toujours extrêmement recherchées. Les objectifs étaient triples, ils se composaient de deux lentilles convergentes de crown, comprenant entre elles une lentille divergente de flint. Actuellement qu'on fait plus que des objectifs à deux

Lunettes de Dollond.

verres, et on obtient un achromatisme aussi parfait. On a d'ailleurs de beaucoup dépassé les dimensions de Dollond puisqu'on arrive à des ouvertures de 12 et 14 pouces. Cependant un bon objectif de 5 à 6 pouces est encore très rare et peut bien valoir 1500 francs; d'un diamètre double il vaudrait au moins dix fois plus. Les artistes qui ont construit les grands réfracteurs pour les observatoires sont Lerebours et Cauchoix à Paris, Fraunhofer et Mertz à Munich. Les plus belles pièces de flint-glass employées dans ces instruments ont été long-temps fournies par un simple fondeur en verre nommé Guinaud, qui travaillait isolément en Suisse; il paraît que son procédé consistait à examiner patiemment dans tous les sens chacun des morceaux en lesquels se divisait spontanément la masse qu'il venait de fondre, et qu'il avait cependant eu soin de laisser refroidir avec une extrême lenteur; quand il avait trouvé quelque belle pièce sans stries, sans défaut, il la faisait ramollir jusqu'à ce qu'elle eût pris la forme d'un disque. Guinaud a travaillé neuf ans avec Fraunhofer; son flint-glass est beaucoup plus dispersif que celui de Dollond, ce qui permet de faire les lunettes plus courtes.

Grands réfracteurs.

La difficulté de trouver de grands disques de flint-glass a donné l'idée de remplacer cette substance par différents liquides, notamment par le sulfure de carbone qui jouit d'un très grand pouvoir dispersif. Le docteur Blair, le docteur Barlow et Fresnel ont construit ainsi quelques lunettes. Le docteur Barlow en a fait une de 8 pouces d'ouverture, mais la lentille fluide placée à 24 pouces derrière la lentille de crown n'avait que 4 pouces. On appelle *dialytiques* les lunettes où les deux parties de l'objectif achromatique sont ainsi à une grande distance l'une de l'autre; la seconde lentille peut être alors d'un diamètre beaucoup moindre que la première; malheureusement il est à peu près aussi difficile de trouver de grandes pièces de crown que de flint sans stries.

Lunettes à lentille fluide.

Lunettes dialytiques.

1702. Cauchoix a remplacé avec avantage, dans les objectifs, le crown par le cristal de roche. Pour une même courbure la lunette est à peu près réduite d'un tiers dans sa longueur (1698, 1557); l'image, à la vérité, est aussi d'un tiers plus petite, mais on l'amplifie par l'oculaire, car le

Lunettes vitro-cristallines.

grossissement définitif peut être porté au même point, puisqu'il dépend surtout de l'ouverture qui reste la même (1564). Si on voulait raccourcir ainsi la lunette, en conservant le crown, il faudrait des courbures plus fortes, ce qui est une grave difficulté. A longueur égale les courbures du cristal étant moindres, elles permettent une plus grande ouverture et par suite un plus fort grossissement. La plus grande pureté de la matière donne aussi un peu plus de clarté, mais il faut que le cristal soit taillé avec beaucoup de soin, pour éviter la double réfraction dont nous parlerons par la suite.

Lunette à prismes.

1703. Le docteur Blair et M. Amici ont fait des lunettes achromatiques sans lentilles, et seulement avec des prismes du même verre. Pour concevoir le principe de cet instrument, il faut observer qu'en regardant un objet à travers un prisme, dans une certaine position, on peut obtenir une image très allongée; il est vrai qu'elle est colorée, mais avec un second prisme tourné en sens inverse il est facile de l'achromatiser, tout en lui conservant encore de l'allongement. Maintenant avec deux autres prismes tout pareils, dont les arêtes sont perpendiculaires à celles des premiers, on peut élargir l'image autant qu'elle a été allongée, et obtenir en définitive une amplification régulière en tout sens. Avec 4 prismes seulement cette amplification peut aller à trois ou quatre fois.

§ V. *Météores dus à la décomposition de la lumière.*

1704. La décomposition de la lumière par la réfraction produit dans l'atmosphère plusieurs phénomènes remarquables dont nous allons maintenant nous occuper.

Arc-en-ciel.

L'iris ou arc-en-ciel est, comme on sait, une bande à peu près demi-circulaire, nuancée de diverses couleurs qu'on aperçoit ordinairement dans les nuées quand le soleil luit malgré la pluie. Souvent il y a deux arcs concentriques, mais nous nous occuperons d'abord seulement de l'intérieur, qui est le plus marqué, et qui se reconnaît d'ailleurs à ce qu'il a le rouge en dehors; les autres couleurs se succèdent en suivant le même ordre que dans le spectre solaire.

Sa cause.

L'arc-en ciel résulte de la décomposition de la lumière du soleil par des gouttes de pluie. Ce n'est pas une peinture pro-

jetée sur les nuages, comme le spectre solaire sur un tableau; ce n'est qu'une espèce de reflet qui change de place et d'étendue, suivant la position de l'observateur et du soleil; aussi ne pouvons-nous le voir que sous certaines conditions. D'abord il faut que nous regardions du côté opposé au soleil; il faut ensuite que cet astre ne soit pas trop élevé au-dessus de l'horizon; s'il est à plus de 42° il n'y a pas d'arc-en-ciel visible. En outre certaines circonstances sont nécessaires pour que ce phénomène soit bien marqué; par exemple une nuée obscure placée derrière fait mieux ressortir les couleurs, et il est clair que si la pluie tombe seulement dans la région opposée au soleil, les rayons arriveront avec moins de perte aux gouttes qui doivent les renvoyer.

Conditions du phénomène.

1705. Il ne peut rester aucun doute sur la cause à laquelle nous attribuons l'arc-en-ciel, quand on considère que ce phénomène se reproduit avec les cascades, les jets d'eau, les gouttes de pluie dispersées sur l'herbe ou sur des toiles d'araignée, en un mot, toutes les fois que le soleil éclaire une nappe de gouttes d'eau. Avec une fontaine de compression sur laquelle on applique le doigt pour avoir une nappe oblique, on peut apercevoir un cercle presque entier; il suffit même pour voir un arc-en-ciel, de projeter de l'eau avec la bouche, de manière à la disperser en gouttelettes pendant qu'on a le dos tourné au soleil.

Moyens de le reproduire.

1706. Quand les gouttes sont libres dans l'air, on peut les supposer à peu près sphériques; après cela, pour savoir comment elles agissent sur les rayons qui viennent les frapper, on n'a qu'à mettre une sphère pleine d'eau sur le trajet d'un faisceau de rayons S G qu'on introduit dans une chambre obscure. On voit alors se peindre sur la muraille ou sur un tableau un arc-en-ciel *rr'* formant un cercle entier dont le diamètre augmente avec la distance. Il est clair d'après cela qu'outre la lumière que la sphère disperse dans tous les sens par des réflexions et des réfractions plus ou moins compliquées, il y a certains rayons, tels que ceux du faisceau G *r*, qui sont renvoyés dans des directions à peu près parallèles, de sorte que la distance ne les affaiblit pas comme ceux qui divergent; aussi les apelle-t-on *rayons efficaces*; leur intensité d'ailleurs est bien supérieure à celle de la lumière diffuse. L'angle des rayons rouges efficaces est

Explication expérimentale.

Fig. 454.

de 84°, celui des rayons violets est de 80°. Comme on le voit les rayons efficaces de chaque couleur forment des cônes creux emboîtés et c'est l'intersection de ces cônes qui donne les zones circulaires de diverses couleurs constituant l'arc-en-ciel qu'on aperçoit sur la muraille.

Quoique les couleurs soient dans le même ordre, ce n'est certainement point là le véritable arc-en-ciel, puisque celui-ci se montre sur la pluie même et non pas dans une région opposée, et que d'ailleurs une seule goutte ne suffit pas à sa production. Mais il est facile de reconnaître d'après ce qui arrive avec une seule goutte, que quand il y en a un grand nombre formant une nappe, on doit voir sur cette nappe un arc-en-ciel tout semblable à celui que présente le tableau dans l'expérience précédente. En effet supposons l'œil en *r*, il recevra le rayon rouge R *r* de la goutte G, et d'une autre goutte située plus bas, le rayon violet V *r* parallèle à G *v*; car toutes les gouttes étant éclairées comme G, doivent renvoyer la lumière de même, c'est-à-dire que chacune d'elles est le sommet d'un cône creux de rayons efficaces. Si donc en résumé, nous menons du point *r* des droites parallèles à tous les rayons efficaces émanés de G, nour sommes sûrs qu'en général ces droites coïncideront avec des rayons efficaces provenant des gouttes auxquelles elles aboutissent. Nous reconnaissons ainsi que le point *r* est le sommet de cônes tout semblables à ceux qui ont leur sommet en G, à cela près que les rayons qui les composent sont empruntés à plusieurs gouttes au lieu de provenir d'une seule. Il est donc certain que l'œil placé en *r* doit voir sur la nappe de gouttes un arc-en-ciel tout semblable à celui qui se peint sur le mur, mais beaucoup plus brillant, puisque les rayons lui arrivent directement. Maintenant il est aisé de reconnaître que le point *r* est arbitraire et que l'arc-en-ciel est visible, au moins en partie, de tous les points situés dans le champ des rayons efficaces provenant de la nappe de pluie.

Circonstances particulières.

1707. La construction précédente montre que le soleil, l'œil de l'observateur et le centre de l'arc sont toujours en ligne droite. Il suit de là qu'on ne peut voir qu'un demi-cercle quand le soleil est à l'horizon, à moins qu'on ne soit sur un pic très élevé et que la pluie ne tombe très près. Le diamètre d'ailleurs augmente avec la distance de la pluie,

puisque l'angle sous-tendu est toujours de 84°. A mesure que le soleil s'élève, le centre de l'arc s'abaisse, et par conséquent la portion visible diminue; elle devient nulle quand la hauteur de l'astre dépasse 42° 1/4. Du reste il est clair que chaque observateur a son arc-en-ciel propre, qui change de place avec lui; ce changement est surtout remarquable dans les parties inférieures, derrière lesquelles on distingue souvent des arbres ou des maisons; la parallaxe est très sensible quand on se déplace. L'arc peut être tronqué pour un observateur placé près des limites de la pluie; il est aussi quelquefois interrompu par des nuages qui arrêtent par places les rayons du soleil.

1708. Pour compléter l'explication, il reste à voir comment se forment les rayons efficaces. A cet effet on prend un large bocal cylindrique rempli d'eau et muni d'une division en degrés; on l'établit dans une chambre obscure, de manière que le diamètre de 0° à 180° soit parallèle aux rayons solaires réfléchis horizontalement par un héliostat; puis, ne laissant plus arriver qu'un faisceau de quelques degrés de largeur, on s'arrange pour que son axe tombe en G à 59° 1/2, d'où il suit que l'angle d'incidence a précisément cette valeur. Alors, en suivant le faisceau dans le liquide, on voit qu'il est réfracté et en même temps décomposé, de manière que les rayons rouges convergent en R sur 159°; de là ils se réfléchissent vers R' en divergeant et sortent *parallèles* suivant une direction R' R'' qui fait un angle de 42° avec leur direction primitive S G, ainsi qu'on peut s'en assurer par des mesures. A cause de leur parallélisme ils forment une tache sensible très loin sur le mur ou sur un verre dépoli. Si on fait arriver le faisceau sous une incidence sensiblement différente de 59° 1/2, tout est changé, et il n'y a plus de rayons efficaces. Ce que nous venons de dire des rayons rouges s'applique aux autres; seulement les angles d'incidence et ceux que les rayons efficaces forment avec la direction primitive sont un peu plus petits, comme la figure le montre pour les rayons violets; de sorte que le rouge est en dehors. Si le soleil éclairait toute la surface du cylindre, il y aurait symétriquement de l'autre côté de 0° un faisceau de rayons incidents qui deviendraient efficaces; et si, au lieu d'un cylindre, on présentait une sphère, il est clair qu'il y

Formation des rayons efficaces. Fig. 453.

aurait parmi les rayons incidents une zone circulaire donnant naissance aux cônes efficaces dont nous avons parlé.

Arc-en-ciel extérieur. Fig. 456. 1709. Lorsque dans l'expérience précédente on fait arriver un faisceau de rayons S G à 72° de l'incidence perpendiculaire, on obtient après deux réflexions (dont la première a lieu vers 161°) des rayons convergents parallèles et par conséquent efficaces; ce sont ces rayons qui produisent l'arc-en-ciel extérieur, dont on peut avoir une représentation avec la sphère d'eau (1706). La figure ici ne donne que la marche du rayon rouge; les autres forment en émergeant un plus grand angle avec la direction primitive, d'où il suit que le rouge occupe la partie intérieure de l'arc. Il se produit à la rigueur encore d'autres arcs-en-ciel par un plus grand nombre de réflexions, mais ces réflexions affaiblissent tellement la lumière que les deux premiers arcs sont seuls visibles. La figure 457 représente la marche des rayons rouges et violets, pour des gouttes prises dans le plan vertical, passant par le sommet V' des arcs et par l'œil supposé en O. On aura cette marche dans toute autre position en imaginant que le plan V O C avec tous les rayons incidents et émergents qu'il contient, tourne autour de la droite OC passant par le soleil, l'œil et le centre commun des deux arcs.

Fig. 457.

Calcul des dimensions de l'arc-en-ciel intérieur. 1710. On peut à l'aide du calcul assigner toutes les dimensions de l'arc-en-ciel. On part de ce fait qu'il y a des rayons efficaces; évidemment ce sont ceux dont la déviation ne varie pas, quoiqu'on fasse venir un peu l'incidence; ce caractère suffit pour que le calcul donne leur direction. Ainsi pour l'arc intérieur, en appelant d l'angle du rayon efficace et du rayon incident et n l'indice de réfraction, on a

$$\sin.^2 \frac{d}{2} = \frac{(4-n^2)^3}{27\,n^4}.$$

Supposons le soleil réduit à un point pour que ses rayons puissent être regardés comme parallèles, en mettant pour n la valeur relative aux rayons rouges qui est 4/3, nous tirerons de la formule $d = 42^\circ\, 2'$; par conséquent nous verrons du rouge dans tous les points de la nappe de pluie où peut aboutir la droite O R sans cesser de faire un angle de 42° 2' avec la ligne O C parallèle aux rayons incidents; c'est-à-dire que

Fig. 457.

nous verrons un arc rouge infiniment étroit ayant son centre sur la ligne O C. Comme ce raisonnement s'applique à tous les points du soleil, nous aurons autant d'arcs rouges que de points dans le disque, et tous les centres étant contenus dans un petit cercle C de même diamètre apparent que le soleil, les arcs superposés constitueront une bande circulaire rouge large d'un demi-degré comme le soleil lui même. Le rayon visuel mené à la partie la plus extérieure de la bande fera un angle de 42° 17′ avec O C. Fig. 458

Tout ce que nous venons de dire pour le rouge s'applique aux autres couleurs, seulement l'angle d devient de plus en plus petit, à mesure que n augmente; de sorte que les bandes ne se recouvrent qu'en partie, ce qui donne la succession des couleurs du spectre, le rouge étant en dehors et le violet en dedans. En prenant pour le violet $n = 109/81$ ou a $d = 40° 17'$; retranchant 15′, il reste 40° 2′ pour l'angle que le rayon visuel mené à la partie la plus intérieure de la bande violette forme avec la droite O C qui passe par l'œil et le centre du soleil. La largeur de l'arc est évidemment la différence des angles des rayons extrêmes rouges et violets, elle est donc de 2° 15′.

Pour l'arc-en-ciel extérieur, la formule est : Dimension de l'arc extérieur.

$$\sin. \frac{d}{2} = \frac{n^4 + 18 n^2 - 27}{8 n^3}$$

Elle donne pour le rouge $d = 50° 59'$, et pour le violet $d = 54° 9'$; d'où il suit que le rouge est en dedans et le violet en dehors. En tenant compte du diamètre du soleil on a 50° 44′ pour le rouge le plus intérieur, et 54° 24′ pour le violet le plus extérieur, ce qui donne 3° 40′ pour la largeur. La distance de deux arcs-en-ciel est évidemment 50° 44′ — 42° 17′ = 8° 17′. Toutes ces dimensions s'accordent avec les mesures directes prises par Newton, autant du moins que le permet l'incertitude des limites, surtout pour l'arc-en-ciel extérieur. Mesures directes.

1711. Quand l'arc-en-ciel est très brillant, on observe près du violet de l'arc intérieur deux ou trois arcs appelés *surnuméraires*, formés chacun d'une bande pourpre et d'une bande verdâtre de plus en plus étroites. Ces arcs provien- Arcs surnuméraires.

nent, comme nous le verrons plus loin, de l'interférence des rayons voisins de ceux qui sont efficaces; leur existence suppose des gouttes à très peu près égales; on reproduit jusqu'à 16 de ces bandes avec un filet d'eau cylindrique d'un millimètre de diamètre. On voit aussi, mais plus rarement, un ou deux arcs surnuméraires bordant le violet de l'arc extérieur. L'intervalle des deux arcs-en-ciel n'en contient pas; il est plus sombre que le reste du ciel, parce que les gouttes de pluie qui s'y trouvent ne renvoient la lumière du soleil ni par une ni par deux réflexions intérieures.

Arc-en-ciel par réflexion. 1712. En se refléchissant sur des eaux tranquilles les rayons du soleil donnent quelquefois lieu à un arc-en-ciel dont le centre est aussi élevé sur l'horizon que celui de l'arc direct est abaissé au-dessous, de sorte que les deux arcs se joignent à l'horizon et que l'un est le complément de l'autre. Quand l'arc refléchi AHC tombe sur l'arc extérieur direct DHE, les couleurs, qui sont, comme on sait, dans un ordre opposé, s'effacent en partie. Il peut à la rigueur y avoir deux arcs réfléchis.

Fig. 459.

Arcs-en-ciel lunaires. On a vu des arcs-en-ciel produits par la lune, mais ils étaient toujours très faibles.

Découverte de l'explication de l'arc-en-ciel. 1713. C'est à un religieux allemand nommé Théodoric, qui professait à Paris dans la faculté de théologie vers 1311, qu'on doit la première explication de l'arc-en-ciel. Cet auteur indique assez bien la marche de la lumière dans les gouttes de pluie pour les deux arcs, sans cependant faire attention à la nécessité du parallélisme des rayons émergents pour qu'il y ait impression sur l'œil. Comme il ne connaissait pas la composition de la lumière, il ramène la production des couleurs au cas de la réfraction à travers un prisme naturel de cristal de roche. Antoine de Dominis, archevêque de Spalatro, qui écrivait en 1590, a imaginé de présenter au soleil à différentes hauteurs des globes de verre pleins d'eau pour reproduire les couleurs des deux arcs. Mais son explication ne vaut pas celle du frère Théodoric; il se trompe même tout-à-fait pour l'arc supérieur. Descartes le premier a déterminé par le calcul la marche de la lumière dans les gouttes de pluie; il a reconnu que de tous les rayons incidents il n'y avait que ceux qui pénétraient sous un certain angle qui pussent revenir à l'œil sans s'écarter les uns des

autres. Enfin Newton, par la découverte de l'inégale réfrangibilité des rayons, a complété l'explication de l'arc-en-ciel, dont il a, comme nous l'avons dit, calculé toutes les dimensions. La théorie des arcs surnuméraires est due au docteur Young.

1714. On appelle *couronnes* de petits cercles irisés concentriques au soleil ou à la lune, qui se montrent souvent quand il y a devant ces astres des nuages minces et transparents. L'aire du cercle plus lumineuse que le reste du ciel présente une teinte bleuâtre ; le bord est coloré en rouge ; dans les autres couronnes on distingue quelquefois les couleurs de l'arc-en-ciel, et le rouge est toujours en dehors. Le demi-diamètre de la première varie de 1° 1/2 à 3° ; les autres suivent la progression 2, 3, 4, de sorte que les bords sont équidistants. A cause de l'éclat de l'astre, les couronnes solaires, comme Aristote l'avait déjà remarqué, se voient mieux par réflexion sur l'eau, surtout quand on fait tomber l'image du soleil hors de cette espèce de miroir. On peut aussi les regarder directement avec des verres colorés ; les limites sont alors plus nettes ; il faut toujours cacher le soleil par un petit disque opaque. Le *stéphanoscope* de M. Delezenne, petit instrument destiné à faire *voir les couronnes*, ainsi que son nom l'indique, se compose de verres colorés bien choisis ; un bleu cobalt et un brun violacé font voir une couronne rouge sur presque tous les nuages qui passent devant le soleil, à moins qu'ils ne soient obscurs jusque sur leurs bords. Mais les couronnes sont surtout visibles quand il n'y a qu'un léger voile de vapeur. Nous n'indiquerons la théorie de ces phénomènes et les moyens de les reproduire qu'en nous occupant de la *diffraction*. Couronnes.

1715. Bouguer, sur les montagnes du Pérou, a vu souvent des couronnes formées par les rayons du soleil *réfléchis* ; ce phénomène s'explique encore par la diffraction ; voici ses principales circonstances d'après le récit de Bouguer : « Un » nuage dans lequel nous étions plongés et qui se dissipa » nous laissa voir le soleil qui se levait et qui était très écla» tant ; le nuage passa de l'autre côté ; il n'était pas à trente » pas, lorsque chacun de nous vit son ombre projetée dessus, » et la sienne seule, parce que le nuage n'offrait pas une sur» face unie. Le peu de distance permettait de distinguer toutes Couronnes par réflexion.

» les parties de l'ombre ; on voyait les bras, les jambes, la » tête ; mais ce qui nous étonna, c'est que cette dernière » partie était ornée d'une *gloire* ou auréole formée de trois » ou quatre petites couronnes concentriques d'une couleur » très vive ; chacune avec les mêmes variétés que le premier » arc-en-ciel, le rouge étant en dehors. Les intervalles en- » tre les cercles étaient égaux ; le dernier cercle était plus » faible ; et enfin à une grande distance nous voyions un » grand cercle blanc qui environnait le tout ; les diamètres » des couronnes changeaient de grandeur d'un instant à » l'autre, mais en conservant toujours entre eux l'égalité » des intervalles. Terme moyen, les diamètres étaient de » 5° 40', 11° et 17°. Celui du cercle blanc était d'environ » 67°. »

Halos.

1716. Les *halos* sont de grands anneaux irisés qui se montrent sur les nuages autour du soleil et de la lune, mais bien plus rarement que les couronnes, dont ils diffèrent par leur grandeur, et surtout parce qu'ils ont le rouge en dedans. On n'en voit jamais que deux ; leurs demi-diamètres sont de 22° et de 45° à peu près ; le plus grand est très rare. L'espace qu'ils comprennent est plus sombre que la partie du ciel située à l'extérieur ; souvent ils paraissent ovales, mais des mesures directes prouvent qu'ils sont circulaires ; l'illusion tient sans doute au moins en partie à la forme apparente du ciel (1602).

Théorie du halo intérieur.

1717. Il est extrêmement probable, comme le supposaient Mariotte et Newton, que le premier halo est dû à la décomposition de la lumière par de petites aiguilles de neige ayant des angles réfringents de 60°. Il semble d'abord que les aiguilles étant disposées de toutes les manières possibles dans les nuages, la lumière décomposée devrait être dispersée également dans tous les sens, et par cela même recomposée, ce qui produirait seulement une blancheur et une demi-transparence analogues à celles du verre dépoli. Mais rappelons nous qu'il y a pour les prismes une position qu'on peut faire varier notablement sans presque changer la déviation (1493) ; alors c'est évidemment comme si cette position était dominante. Or, si pour plus de simplicité d'abord nous supposons que le soleil soit réduit à un point, et qu'il envoie seulement de la lumière rouge, nous aurons 21° 50' pour la

déviation *minima* dans un prisme de glace de 60°, et nous pourrons affirmer que le rouge dominera dans les directions RO, R'O qui font cet angle avec les rayons solaires. Ainsi l'œil O verra le rouge dominer à 21° 50', tout autour de sa droite OS menée au centre du soleil; dans les autres directions il n'y aura pas de rayons *efficaces*. Maintenant, si nous rendons au soleil ses dimensions, nous concevrons qu'au lieu d'une simple circonférence on devra voir une bande circulaire rouge, large d'un demi-degré, dont le demi-diamètre intérieur sera de 21° 35'; puis viendront se superposer les bandes des autres couleurs de même largeur, mais d'un plus grand diamètre, puisque n est plus grand, de sorte que le rouge débordera en dedans et le violet en dehors. Il est clair que si l'œil change de place il reçoit d'autres rayons efficaces ayant la même direction que les premiers, mais qui lui font voir le halo sur d'autres points du nuage; celui-ci a quelquefois assez d'étendue pour que le phénomène soit visible en des points distants de 40 lieues, comme l'a remarqué M. Delezenne. Fig. 460.

1718. Le grand halo est beaucoup plus rare que le petit. Cavendish l'a expliqué par des prismes de glace de 90°; M. Brewster dit avoir vu dans une gelée blanche de petites aiguilles offrant cet angle; le calcul donne dans ce cas 45° 44' pour la déviation *minima*. **— du halo extérieur.**

1719. M. Arago a reconnu, comme nous le dirons plus loin, que la lumière des halos était polarisée par réfraction, ce qui confirme la théorie de Mariotte, laquelle d'ailleurs s'accorde bien avec les mesures directes, car MM. Peytier et Hossard, qui ont mesuré un grand nombre de halos dans les Pyrénées, ont trouvé terme moyen pour les demi-diamètres 21° 52' et 45° 27'. M. Brewster a indiqué un moyen très simple de reproduire des anneaux colorés tout-à-fait analogues aux halos; il suffit pour cela de regarder le soleil ou une bougie à travers une vitre couverte d'une légère cristallisation de chlorure d'étain ou d'alun; ce dernier sel donne trois halos. **Vérifications.**

1720. Les parhélies ou faux soleils sont des lumières fort vives qui paraissent quelquefois à côté du soleil. Les plus ordinaires appelés parhélies latéraux se voient en même temps que le halo de 22°, et sont placés sur sa circonférence **Parhélies.**

à droite et à gauche du soleil à la même hauteur que cet astre. Ils ont des couleurs à peu près semblables à celles de l'arc-en-ciel, le rouge tourné du côté du soleil; ils sont allongés horizontalement, le diamètre selon l'ordre des couleurs étant environ deux fois plus grand que l'autre. Leur éclat est quelquefois comparable à celui du soleil, de sorte que l'œil ne peut pas le supporter. On observe avec la lune des phénomènes analogues qui prennent le nom de *parasélènes*.

Parasélènes.

Suivant l'explication de Mariotte, qui est adoptée par M. Babinet, les parhélies latéraux ne sont pas autre chose que l'image du soleil vue à travers les aiguilles qui forment le halo de 22°. Il suffit d'imaginer que l'atmosphère contient un grand nombre de ces petites aiguilles dans une situation verticale; il est clair que celles qui seront à la hauteur du soleil à 22° de distance à peu près de part et d'autre devront, nous faire voir le spectre solaire, comme cela aurait lieu avec un prisme de verre. Ce que nous avons dit relativement au halo montre pourquoi ce spectre ne se voit que dans la déviation *minima*. Quand le soleil est assez élevé, et que par conséquent ses rayons sont fort obliques par rapport à l'axe des prismes, les parhélies paraissent un peu en dehors du halo, parce que la réfraction se fait hors de la section principale; c'est alors comme si l'angle réfringent était plus considérable.

Fig. 461.

On a vu quelquefois un plus grand nombre de parhélies; la figure 461 donne une idée de la complication que peuvent présenter ces phénomènes d'optique météorologique; S est le vrai soleil; L, L sont les deux parhélies latéraux; V V deux parhélies verticaux plus faibles, tous les quatre dans le premier halo ou très près en dehors; dans le second peuvent se trouver quatre parhélies toujours moins brillants *l*, *l*, *v* *v'*. Les verticaux inférieurs manquent souvent, parce que le soleil n'est pas assez élevé. T T, *t t* sont des espèces de croissants adossés aux halos, et qui ressemblent à des portions de halos renversés; on les appelle *arcs tangents*.

Arcs tangents.

Cercle parhélique.

l A *l* est un grand cercle *horizontal* nommé *parhélique*; c'est une traînée de lumière blanche ayant la même largeur que le soleil, par lequel elle passe ainsi que par les parhélies; son éclat est plus vif à partir des parhélies latéraux, qui semblent ainsi avoir une espèce de queue. M. Babinet explique

ce cercle par la réflexion de la lumière sur les faces verticales des prismes; c'est à peu près comme s'il y avait de petites glaces étroites tout autour d'une chambre; en regardant une bougie avec un cristal fibreux comme la tourmaline, la diopside, etc., on reproduit un cercle lumineux analogue qui passe toujours par la bougie. En A sur le cercle parhélique se trouve quelquefois une image incolore du soleil qu'on appelle un *anthélie*. Enfin une faible traînée verticale de lumière blanche S V *v* forme assez souvent des espèces de croix avec les halos et le cercle parhélique; il semble que ce soit une portion d'un cercle parhélique vertical.

Il est extrêmement rare de voir le phénomène aussi complet, mais souvent on en voit quelque partie; ainsi, pour ne pas remonter très haut, M. Delezenne, à Lille, a vu, le 13 mars 1838, à 8 $\frac{1}{2}$ heures du matin, le halo du 22° avec les parhélies latéraux, un arc tangent et une croix formée par l'intersection des deux cercles parhéliques; le phénomène a duré près d'une heure. Quelques parties n'étaient visibles qu'à l'aide du stéphanoscope, mais les parhélies brillaient du plus vif éclat. M. Quetelet, à Bruxelles, a vu, le 2 juin 1839, le halo intérieur avec les deux parhélies verticaux, et une croix formée par l'intersection d'un arc parhélique vertical et du halo; le phénomène a duré depuis 11 $\frac{1}{2}$ heures jusqu'au soir.

CHAPITRE VI.

INTERFÉRENCE ET DIFFRACTION DE LA LUMIÈRE.

---

§ 1. *Phénomène de l'interférence.*

1721. On entend par *interférence* de la lumière l'extinction plus ou moins complète de deux rayons par le fait même de leur rencontre. Voici une expérience de Fresnel qui met le phénomène en évidence. Imaginons qu'une petite ouverture faite au volet M M d'une chambre obscure

Ce qu'on entend par interférence. Expérience de Fresnel. Fig. 462.

soit fermée par une lentille l d'un très court foyer. En dirigeant horizontalement le soleil sur cette lentille à l'aide d'un héliostat, nous aurons un point lumineux F que nous pourrons doubler avec un prisme P à deux angles très aigus qui agira dans ce cas comme un verre à facettes; ce sera comme si le point lumineux F n'existait plus et qu'il y en eût deux autres f, f à sa place. Ces dispositions prises, si on place un carton blanc ou un verre dépoli VV dans le champ commun des deux cônes lumineux, on voit, au lieu d'une surface uniformément éclairée, une série B de bandes d'égale largeur, alternativement brillantes et obscures. Ces bandes sont parallèles aux arêtes du prisme et symétriques par rapport aux deux points rayonnants. Fresnel s'est assuré qu'elles se propageaient suivant des hyperboles ayant ces points pour foyers et le point lumineux F pour centre; la bande moyenne, c'est-à-dire celle qui répond à la ligne de symétrie, est une bande brillante. Si on couvre les faces du prisme pour arrêter un des cônes lumineux, il ne reste plus qu'une lumière uniforme, ce qui prouve bien que les bandes obscures résultent de la rencontre des rayons.

On distingue beaucoup mieux les bandes, lorsqu'au lieu de les recevoir sur un verre dépoli, on les regarde directement avec une loupe L comme une image aérienne; il faut écarter l'œil de la loupe de manière que toute la surface de celle-ci paraisse éclairée.

Remarque. 1722. Quand on opère avec la lumière ordinaire, comme nous l'avons supposé, il se produit des couleurs, de sorte que les bandes sont irisées; mais ces iris disparaissent quand on emploie une lumière homogène; par exemple quand on met un verre rouge devant la petite lentille ou devant l'œil, on n'a plus que des bandes alternativement rouges et noires; en même temps elles sont beaucoup plus nombreuses; on en peut compter une douzaine de chaque espèce, si les distances du prisme et de la loupe sont bien choisies. En opérant successivement avec les différentes lumières homogènes, on reconnaît que les bandes sont d'autant plus étroites que la lumière est plus réfrangible; avec la lumière violette, leur largeur est presque moitié moindre qu'avec la lumière rouge. Il est évident d'après cela que les iris qu'on observe avec la lumière composée proviennent de ce que chaque

couleur simple donne un système de bandes, et que ces bandes se débordent en se superposant. Dans les phénomènes d'interférence nous aurons continuellement occasion de voir des couleurs ainsi produites; nous renverrons à ce que nous venons de dire pour expliquer leur apparition.

Pour qu'il n'y ait pas de confusion même avec la lumière homogène, il est nécessaire que la petite image du soleil qui forme le point lumineux ait très peu de largeur, car à la rigueur chaque point de cette image produit un système de bandes, et l'écart des systèmes extrêmes est égal à la largeur de l'image.

Fresnel, pour doubler le point lumineux, s'était d'abord servi de deux miroirs, mais le verre prismatique est plus commode.

On a plus de lumière avec une lentille cylindrique qu'avec une lentille sphérique; mais on peut très bien remplacer ces lentilles par une fente étroite ou par un petit trou. On peut même à la rigueur remplacer la lumière du soleil par celle d'une lampe ou d'une bougie.

Soleil, opticien à Paris, a construit, d'après les conseils de M. Babinet, un appareil où cette expérience et une foule d'autres relatives à la diffraction, se font très aisément sur une étendue qui ne dépasse guère un mètre.

Conditions pour que deux rayons interfèrent.

1723. Après avoir vu les interférences produites par des faisceaux lumineux, ce qui est un phénomène assez complexe, suivons maintenant deux rayons en particulier, et recherchons les conditions pour qu'ils interfèrent. Nous savons déjà que pour l'interférence complète ils doivent être *homogènes*, c'est-à-dire de la même couleur. Il faut ensuite qu'*ils soient originairement partis du même point;* car il est impossible de faire l'expérience précédente avec des rayons empruntés à des lumières différentes ou à des points différents de la même lumière. Il faut encore qu'*ils se rencontrent sous un angle très aigu;* il est évident que les prismes ou les miroirs ne servent en définitive qu'à ramener les rayons l'un vers l'autre dans des directions presque parallèles. Enfin, *il doit y avoir une certaine différence dans les chemins parcourus.* En effet, les bandes étant rangées symétriquement, et celle du milieu étant brillante, il s'ensuit déjà qu'il n'y a pas d'interférence quand les chemins

parcourus sont égaux ; mais comme nous voyons de chaque côté une succession de bandes obscures et brillantes, il est clair qu'il n'y a d'interférence que pour certaines différences dans les chemins parcourus ; pour d'autres, au contraire, les lumières s'ajoutent. Soit l la différence fb de ces chemins pour le milieu de la première bande brillante latérale ; des mesures très exactes ont prouvé que pour la deuxième bande brillante, la différence était $2l$, pour la troisième $3l$, et ainsi de suite. Pour les bandes obscures, les différences des chemins parcourus sont successivement $\frac{1}{2}l$, $\frac{3}{2}l$, $\frac{5}{2}l$. Dans toutes les expériences cette différence l reste toujours la même pour une couleur donnée ; aussi l'appelle-t-on l'*intervalle fondamental des interférences*.

Principe des interférences.

1724. Maintenant, pour résumer, nous pouvons poser ce principe établi d'abord par Young : *Lorsque deux rayons homogènes partis d'un même point se rencontrent sous un angle très aigu, ils s'ajoutent ou se détruisent, selon que la différence des chemins parcourus est un multiple pair ou impair du demi-intervalle des interférences*. La largeur des bandes montre que le principe s'applique encore sensiblement quand la différence des chemins s'éloigne peu de la valeur assignée. Il est à remarquer qu'en général il n'y a plus d'interférence quand cette différence est très considérable ; quand elle est égale, par exemple, à 30 ou 40 fois la valeur de l.

Explication de l'interférence.

1725. On se rend compte du phénomène de l'interférence en admettant que la lumière se propage par des ondulations analogues à celles qu'on voit à la surface des liquides (440). Que sur une eau tranquille on produise à la fois des ondulations égales partant de deux centres, on verra se former par leur rencontre des lignes M, N, P, où l'agitation de l'eau sera très forte, et entre ces lignes on en verra d'autres où la surface reste sensiblement plane ; cela résulte, comme on sait, de ce que les deux systèmes d'ondulations se propageant à la fois, les mouvements s'ajoutent dans certains points et se détruisent dans d'autres (813, 814). En imaginant des ondulations sphériques, au lieu d'ondulations planes, on aurait évidemment sur un plan vertical VV des espaces linéaires de repos et de mouvement analogues aux bandes obscures et brillantes de l'expérience de Fresnel. On arrive ainsi à concevoir comment des ondulations dans l'é-

Fig. 463.

ther (1364) peuvent donner lieu à des interférences; et cette explication si naturelle d'un phénomène qui paraît d'abord fort étrange, est certes une des meilleures raisons de croire qu'en effet la lumière est due à des ondulations. Pour le détail de l'explication, nous continuerons à considérer les ondulations de l'eau; ce que nous en dirons s'appliquera sans peine à celles de l'éther par analogie.

1726. Supposons que dans la figure 463 les circonférences pleines marquent dans les ondes les points de plus grande élévation, et que les circonférences ponctuées marquent ceux de plus grand abaissement; il est clair que les intersections de deux circonférences pleines ou de deux circonférences ponctuées seront des points de mouvement maximum, et qu'au contraire l'intersection d'une circonférence pleine et d'une circonférence ponctuée sera un point de repos ou d'interférence complète. Par conséquent, la ligne de symétrie M, où se coupent les circonférences de même rayon, sera une ligne de mouvements maximum; il en sera de même des lignes N, P, où se coupent les circonférences dont les rayons diffèrent de 2, de 3 ondulations. Dans les intervalles on aura des lignes d'interférences formées par les intersections des circonférences dont les rayons diffèrent de 1, de 2, de 3 demi-ondulations. On voit d'après cela que les points d'interférence sur la ligne VV sont rangés par rapport aux centres d'ondulation, comme les bandes obscures, par rapport aux points lumineux, et que l'intervalle fondamental des interférences n'est pas autre chose que la longueur d'une ondulation.

Comment on rend compte de la disposition des lignes obscures et brillantes. Fig. 463.

Il est évident aussi que chaque ligne de repos ou de mouvement est une branche d'hyperbole, car le caractère de cette courbe est *une même inégalité de distance de tous ses points à deux points donnés.*

1727. On remarque que quand les centres d'ondulation sur l'eau sont plus écartés, les lignes de mouvement et de repos sont plus serrées; c'est d'ailleurs une conséquence géométrique de l'interférence des ondes (1731). On conçoit d'après cela que si les points lumineux sont trop écartés, les bandes obscures et brillantes pourront se serrer tellement, qu'on ne pourra plus les distinguer; leur largeur, il est vrai, augmente à mesure qu'on s'éloigne, mais alors la lumière finit par être insensible. On comprend donc la nécessité de

Pourquoi les rayons doivent se croiser à angle aigu.

rapprocher les points lumineux, ce qui revient à faire croiser les rayons (1385) sous un angle aigu.

Pourquoi les rayons doivent partir du même point.

1728. Les lignes d'inférences sur l'eau sont irrégulières et changent de direction quand les ébranlements qui produisent les ondulations ne sont pas simultanés et identiques; il en est de même pour la lumière; mais les changements alors se succèdent si rapidement que l'œil ne distingue plus les bandes brillantes des bandes obscures; c'est pourquoi il n'y a pas d'interférence sensible quand les deux points lumineux sont indépendants.

Pourquoi la différence des chemins ne doit pas être trop grande.

1729. Nous avons dit qu'il n'y avait pas non plus d'interférence sensible quand la différence des chemins parcourus était très considérable. Cela résulte sans doute de ce qu'en général les vibrations lumineuses ne se continuent pas sans interruption; les ondulations alors se succèdent par séries à des intervalles irréguliers, et quand celles qui se rencontrent n'appartiennent pas à la même série, c'est à peu près comme si elles provenaient de points lumineux indépendants.

Pourquoi la lumière doit être homogène.

1730. Nous devons considérer la lumière *homogène*, ou d'une seule couleur, comme formée par des ondulations égales; il est évident d'ailleurs que les ondulations doivent être égales pour que l'interférence soit complète; on conçoit donc très bien la nécessité de la lumière homogène pour obtenir des bandes tout-à-fait obscures.

Longueur d'une ondulation lumineuse.

1731. L'expérience des interférences (1721) donne le moyen de mesurer la longueur d'une ondulation lumineuse, c'est-à-dire *la longueur de rayon comprenant toute les phases du mouvement vibratoire qui constitue la lumière;* cette longueur, dans la figure 463, est évidemment l'intervalle de deux circonférences pleines ou ponctuées. Soient ff les deux points lumineux; AB, CD, deux ondulations qui s'entrecoupent sur la ligne de symétrie Fl à une distance assez considérable pour que leur courbure soit insensible sur une petite étendue, et que la longueur lm de leur intersection se confonde avec la longueur de l'ondulation. On a ainsi deux triangles isocèles mnl et flf qui sont semblables comme ayant les côtés respectivement perpendiculaires. La hauteur h du petit est évidemment la distance de deux maxima de lumière, ou ce que Fresnel appelle la largeur d'une *frange;* la hauteur H du grand est la distance Fl du

Fig. 464.

point lumineux ; et il est clair qu'en désignant les bases par l et L, on peut poser H : L :: h : l, c'est-à-dire que *la distance du point lumineux est à l'intervalle des images, comme la largeur d'une frange est à la longueur d'une ondulation.*

H se mesure sans peine ; pour avoir h, on n'a qu'à mettre au foyer de la loupe un micromètre (1557) ou un verre portant le millimètre divisé en 100 parties; on peut s'assurer ainsi que les franges ont toutes la même largeur ; si donc on mesure la largeur de 10 franges, par exemple, on aura très exactement la largeur d'une seule en prenant la dixième partie. Quant à l'écartement L des images, pour le mesurer, Fresnel employait un écran EE percé d'un très petit trou ; l'écartement des points du micromètre où se projetaient les images lui donnait la base d'un triangle isocèle gtg semblable à ftf; les hauteurs étant mesurées, une simple proportion faisait connaître ff ou L. Un point noir très fin, qui se formait par diffraction au centre de la petite ouverture t (1767) permettait d'assigner très nettement la position des points $g\,g$. Fig. 465.

Voici les données d'une expérience faite avec la lumière rouge :

Distance du point lumineux au petit trou . .	$5^{m},877$	
Distance du petit trou au micromètre	$1\ ,265$	
Distance totale ou valeur de H	$7\ ,142$	
Intervalle entre les centres des projections lumineuses du petit trou.		$4^{mm},66$
On en tire pour l'intervalle L entre les images du point lumineux.		$21\ ,65$
Largeur de 11 franges ou valeur de 11 h. . .		$2\ ,30$

La proportion donne $l = 0^{mm},000638$, et cette quantité si petite s'obtient ainsi avec beaucoup d'exactitude, parce que les mesures, comme on le voit, se prennent sur des quantités beaucoup plus grandes.

1732. La longueur de l'ondulation varie avec la couleur de la lumière; les longueurs suivantes, exprimées en millioniémes de millimètres, se rapportent aux raies du spectre (1631) et à la partie moyenne des couleurs : Longueur de l'ondulation pour les différentes couleurs.

B	C	rouge.	D	orangé.	jaune.	E	vert.	F	bleu.	indigo.	G	violet.	H
688	656	620	589	583	551	526	512	484	475	449	429	423	393

Pour le rouge et le violet extrêmes, les longueurs, d'après M. Babinet, sont 710 et 340; c'est 592 pour la flamme de l'alcool salé (1637). Terme moyen, on voit qu'une ondulation lumineuse est un peu plus grande qu'un demi-millième de millimètre, ce qui n'est pas une quantité infiniment petite, puisqu'il faudrait plus de 6 feuilles d'or pour former une épaisseur pareille (136).

— pour les différents milieux.

1733. La longueur d'une ondulation étant nécessairement égale à l'espace parcouru par la lumière pendant une vibration du point lumineux (807), il s'ensuit que si la durée de cette vibration est t, on aura vt, et $v't$ pour les longueurs l et l' d'ondulation dans deux milieux où les vitesses de la lumière soit v et v', et par conséquent $l : l' :: v : v'$. Supposons que l et v se rapportent à l'air, $\frac{v}{v'}$ sera l'indice n de réfraction du milieu que l'on considère (1502), et on tirera $l' = \frac{l}{n}$, c'est-à-dire que la longueur de l'ondulation dans un milieu se trouve en divisant la longueur dans l'air par l'indice de ce milieu. Prenant, par exemple, $n = \frac{4}{3}$ pour l'indice des rayons rouges dans l'eau, on a $0^{mm}000465$ pour la longueur de l'ondulation rouge dans ce liquide.

Déplacement des franges quand les milieux sont différents.

1734. M. Arago a découvert qu'en général les franges d'interférence n'étaient pas placées symétriquement quand les milieux traversés n'étaient pas les mêmes. Si, par exemple, on met une lame très mince de verre soufflé sur le trajet des rayons d'un des points lumineux, on reconnaît que les franges se forment *plus près de ce point que de l'autre.* Pour concevoir ce déplacement, supposons qu'on opère avec la lumière rouge, et que l'épaisseur de la lame soit précisément égale à la longueur de 2 demi-ondulations dans l'air; d'après ce que nous venons de dire tout-à-l'heure, il y aura 3 demi-ondulations dans cette lame, en supposant l'indice dans le verre égal à $\frac{3}{2}$. On aura par conséquent une demi-ondulation de différence pour les rayons qui se rencontreront sur la ligne de symétrie, et ces rayons se détruiront au lieu de s'ajouter. Il y aura de même une demi-ondulation de plus pour tous les rayons qui auront traversé la lame; la bande lumineuse moyenne, qui est toujours produite par les rayons d'un même nombre d'ondulations, devra

donc se trouver du côté de cette lame, précisément à la place de la première bande obscure qui aura aussi reculé d'un rang, de sorte qu'en définitive tout le système se trouvera déplacé de la largeur d'une bande ou d'une demi-frange. Pour généraliser, soit l la longueur de l'ondulation dans l'air, e l'épaisseur du milieu interposé, n son indice de réfraction, $\frac{ne}{l}$ et $\frac{e}{l}$ seront les nombres d'ondulations dans le milieu et dans l'air pour l'épaisseur commune e; de sorte que $\frac{e(n-1)}{l}$ sera le nombre d'ondulations qu'auront en plus les rayons transmis par la lame; il est clair que ce nombre est égal à celui des *franges*, ou doubles bandes, contenues dans le déplacement; on aura donc $\frac{e(n-1)}{l}=\frac{a}{h}$ en appelant h la largeur d'une frange et a le déplacement de la bande brillante centrale.

1735. Le sens du déplacement prouve que la vitesse de la lumière est moindre dans les milieux plus réfringents. L'accord des résultats donnés par la formule et par l'expérience établit en outre, comme nous l'avions supposé, que le rapport des vitesses dans deux milieux est précisément égal au rapport de réfraction (1502). Applications. Vitesse de la lumière dans les différents milieux.

1736. La formule fournit un nouveau moyen de mesurer les indices de réfraction, puisqu'on en peut tirer n lorsque les autres quantités sont connues. Ce procédé est surtout précieux pour comparer les indices dans deux milieux où ils sont à peu près les mêmes. Que l'on mette sur le trajet des rayons deux tubes égaux fermés par des glaces de même épaisseur et disposés de manière qu'on y puisse condenser ou raréfier l'air, on verra qu'une différence d'un millimètre dans la pression, ou le faible changement de densité dû à la chaleur de la main, suffisent pour déplacer les franges. On peut ainsi comparer la réfraction de l'air sec et de l'air humide, et même mesurer la dispersion dans les gaz. M. Arago a reconnu par ce procédé que la chaleur augmentait la réfraction des solides, et diminuait au contraire celle des liquides. Mesure des indices de réfraction.

1737. Lorsqu'on examine attentivement la *scintillation*, surtout avec une lunette, on reconnaît qu'elle consiste non Scintillation des étoiles.

pas en un déplacement de l'étoile, mais en une variation rapide d'éclat et de couleur. M. Arago explique ce phénomène par des interférences entre les rayons qui composent le faisceau reçu par l'œil. En effet, si quelques uns de ces rayons traversent des portions d'air qui diffèrent de celles traversées par les autres, ou en densité, ou en humidité, on conçoit qu'il y aura des interférences au point de concours; alors l'image, privée, par exemple, d'une partie des rayons rouges, se colorera de la teinte verte complémentaire; l'instant d'après la couleur changera, parce que l'état de l'atmosphère est très variable. En même temps ces interférences plus ou moins complètes feront nécessairement varier l'intensité de la lumière. La scintillation est plus forte vers l'horizon, parce que les rayons du faisceau que reçoit l'œil ont alors plus de chances d'éprouver des accidents différents; ces chances augmentent encore évidemment avec la largeur du faisceau; c'est ce qui contribue, avec la plus grande quantité de lumière, à rendre le phénomène plus sensible dans les lunettes. Souvent l'étoile paraît blanche, parce que les images persistent sur la rétine et se superposent à cause de la durée de la sensation; si dans ce cas on agite un peu la lunette, on voit, au lieu d'un point blanc, une ligne diversement colorée.

La scintillation a lieu pour chaque point d'une surface lumineuse, mais les compensations la rendent d'autant moins apparente, que la surface est plus grande; voilà pourquoi, en général, les planètes ne scintillent pas; du moins on ne s'aperçoit pas des variations d'intensité; quant aux changements de couleur, ils sont quelquefois appréciables.

Couleurs des lames mixtes. 1738. En regardant une bougie à travers deux lames de verre, entre lesquelles se trouve un peu d'humidité *mêlée d'air*, on voit des couleurs dont la production s'explique par l'interférence des rayons qui ont traversé des milieux différents. L'expérience réussit également avec des mélanges d'huile et d'air, d'huile et d'eau, etc. En chauffant un peu et en rapprochant convenablement les verres, on donne à la lumière transmise une teinte uniforme rouge, bleue, violette, à volonté; de sorte que la lune et le soleil vus à travers l'appareil peuvent prendre toutes les couleurs; seulement, pour le soleil il est nécessaire d'affaiblir la lumière. M. Ba-

binet a tiré de ces expériences l'explication toute naturelle de la couleur bleue que présente quelquefois le soleil à travers certains nuages. C'est le Dr Young qui a observé le premier les couleurs des lames mixtes.

§ 11. *Couleurs des lames minces, anneaux colorés.*

1739. Les substances transparentes réduites en lames très minces peuvent, indépendamment de tout mélange, produire des couleurs extrêmement vives, surtout par réflexion. On connaît les nuances variées des bulles de savon; le verre soufflé en présente de pareilles; on en voit aussi sur certaines vitres qui s'écaillent par l'action du soleil et de l'humidité; le mica se clive en feuilles assez minces pour présenter des couleurs très vives. L'évaporation graduelle d'un liquide étendu sur un marbre noir donne aussi des couleurs; on a des anneaux colorés très réguliers en insufflant de la vapeur d'eau avec un tube sur un verre noir légèrement enduit de savon. Une goutte d'huile ordinaire, ou mieux d'huile de lavande, forme de grands cercles irisés en s'étendant sur la surface de l'eau; quelques eaux stagnantes présentent des couleurs analogues. Les nuances variées que prennent le cuivre et l'acier quand on les chauffe sont dues à une couche d'oxide assez mince pour être transparente. Les *couleurs de Nobili*, dont nous parlerons par la suite, appartiennent encore aux lames minces. **Couleurs des lames minces.**

1740. En appliquant deux glaces l'une contre l'autre, on développe dans leur intervalle des couleurs qui varient avec la pression. Les unes, qu'on appelle *réfléchies*, se voient très bien quand les glaces sont au-dessus d'une surface noire devant une fenêtre ouverte; les autres, qu'on appelle *transmises*, se voient en regardant le ciel à travers les glaces; elles sont complémentaires (1664) des premières, mais beaucoup plus faibles. Ces couleurs, réfléchies et transmises, s'observent de même avec les bulles de savon, le verre soufflé, etc. Du reste, celles qui se développent entre des glaces, entre des feuillets de mica, et en général entre les interstices des corps transparents, ne sont pas dues à l'air interposé, car elles subsistent dans le vide. **Couleurs réfléchies.** **Couleurs transmises.**

1741. On peut conclure des exemples précédents que la **Comment**

elles se produisent. condition essentielle pour la production des couleurs des lames minces est que la lumière tombe sur deux surfaces réfléchissantes très voisines. Maintenant, pour concevoir cette production, imaginons deux surfaces réfléchissantes Fig. 466. parallèles MN, OP, sur lesquelles tombe un rayon AB de lumière homogène. Ce rayon unique donnera une série de rayons réfléchis et transmis d'intensité décroissante, parmi lesquels nous considérerons seulement les deux premiers, D, G et D′, D″, de chaque espèce. Ces rayons ne peuvent pas interférer, puisqu'ils ne coïncident pas (excepté dans le cas de l'incidence perpendiculaire); mais si au lieu d'un seul rayon incident nous en avons un faisceau provenant d'un point assez éloigné pour qu'ils soient sensiblement parallèles, il est clair que chaque rayon réfléchi à la première surface coïncidera avec un rayon réfléchi à la seconde, et que de même chaque rayon transmis directement coïncidera avec un rayon transmis après deux réflexions. On pourra donc avoir des interférences, c'est-à-dire que les surfaces pourront paraître obscures quand on les regardera dans la direction des rayons réfléchis ou transmis. Les interférences seront sensibles dans un grand nombre de directions, si au lieu d'un point lumineux, on a une surface éclairante que nous supposons toujours envoyer de la lumière homogène. Mais si elle envoie de la lumière composée, l'interférence entre certains rayons devra faire prédominer les couleurs des autres, et c'est ce qui donne naissance à la teinte composée qu'on aperçoit. Les couleurs transmises sont très faibles, parce qu'il y a une différence énorme d'intensité entre le rayon transmis directement et celui qui l'est après deux réflexions, d'où il suit que l'interférence est très incomplète.

Anneaux colorés de Newton. 1742. Nous examinerons maintenant les couleurs des lames minces dans un cas particulier où l'on a l'avantage de pouvoir prendre des mesures très précises; nous découvrirons ainsi un fait nouveau qui joue un grand rôle dans les phénomènes d'interférence et qui nous permettra de compléter l'explication précédente. Lorsqu'on pose une Fig. 467. Fig. 468. lentille convexe d'un très grand rayon sur un verre plan, il se forme autour du point de contact des anneaux colorés, fig. 468, qui ont été particulièrement étudiés par Newton.

Les deux surfaces réfléchissantes, dans ce cas, sont la face inférieure de la lentille et la face supérieure du verre; leur écartement, qui augmente à partir du centre, donne une succession de lames annulaires de plus en plus épaisses dont chacune réfléchit et transmet la couleur qui convient à son épaisseur. Le centre des anneaux réfléchis offre une tache noire quand les verres sont suffisamment pressés; celui des anneaux transmis offre au contraire une tache blanche; d'ailleurs ces deux classes d'anneaux ont des teintes exactement complémentaires (1750). Les anneaux se rétrécissent et se serrent à mesure qu'ils s'éloignent du centre; il est à noter qu'ils paraissent plus larges quand on les regarde obliquement, de sorte que l'obliquité, dans ce cas, produit le même effet qu'un rapprochement des surfaces. Avec la lumière homogène, il y a seulement une succession d'anneaux sombres et brillants d'un diamètre d'autant moindre, que la couleur est plus réfrangible, de sorte que le violet forme les plus petits et le rouge les plus grands. On conçoit d'après cela que les anneaux colorés donnés par la lumière composée résultent de ce que les anneaux de chaque couleur simple se débordent au lieu de se superposer exactement. Mais alors, à cause de la recomposition de la lumière, on n'a guère que 6 ou 7 anneaux distincts, tandis qu'avec une lumière homogène (1637) la surface entière de la lentille peut en être couverte. On en voit aussi un très grand nombre avec un prisme, parce que les anneaux de chaque couleur se séparent.

1743. Nous avons dit que le centre des anneaux réfléchis présentait une tache noire; or comme dans ce cas la distance des deux surfaces réfléchissantes est à peu près nulle, il s'ensuit que nous avons une interférence complète sans qu'il y ait de différence dans les chemins parcourus. Mais il faut remarquer que les deux réflexions se font alors dans des circonstances inverses, l'une ayant lieu du verre sur l'air et l'autre de l'air sur le verre; on doit donc admettre que cette opposition dans les réflexions équivaut à une différence d'une demi-ondulation dans les chemins parcourus. La théorie, comme nous le verrons, rend compte de ce principe dont l'exactitude d'ailleurs peut se démontrer par des expériences dues à M. Babinet. Ainsi on a des anneaux à

Perte d'une demi-ondulation par la réflexion.

centre blanc quand on met de l'huile de sassafras ou de gérofle entre une lentille de flint et un verre de crown ; l'huile ayant un indice intermédiaire, les réflexions se font toutes deux d'un milieu plus réfringent sur un milieu moins réfringent, ou *vice versâ*, et dans ces deux cas il n'y a pas d'interférence. Une autre vérification consiste à recevoir les rayons dans l'expérience des interférences (1721) sur une glace à faces parallèles, étamée seulement en partie, de manière que les uns se réfléchissent sur l'air et les autres sur l'étamage. On reconnaît alors que les bandes sont déplacées d'un rang, ce qui prouve bien que la différence des réflexions équivaut à une différence d'une demi-ondulation dans les chemins parcourus (1734).

Remarque. Fig. 466. 1744. Il est à noter que les rayons G, G', G'', qui ressortent après des réflexions multiples sur les deux faces d'une lame parallèle, sont tous d'accord entre eux, puisque le nombre des réflexions est toujours pair ; de plus, le calcul montre que leur somme totale formerait une quantité de lumière égale à celle du rayon BD réfléchi par la première surface. D'après cela on voit qu'il peut y avoir interférence complète si la lame a une certaine étendue (1741), et on reconnaît que sous l'incidence perpendiculaire le centre des anneaux réfléchis doit paraître absolument noir.

Épaisseurs qui donnent l'interférence. 1745. En partant du principe que nous venons de démontrer (1743), et en supposant une lame dont la réfraction ne soit pas intermédiaire entre celles des deux milieux qui la comprennent, on trouve, conformément à l'expérience, qu'il y a destruction ou addition des rayons réfléchis, suivant que l'épaisseur est égale à un nombre pair ou impair de quarts d'ondulations ; c'est l'inverse pour les rayons transmis.

Dimensions des anneaux. Fig. 467. 1746. Dans le cas d'une lentille posée sur un verre plan, il est aisé de calculer le rayon AD $= r$ d'un anneau et l'épaisseur BD $= e$ de la lame correspondante. Prenons, par exemple, le cinquième anneau brillant vu par réflexion avec de la lumière dont la longueur d'ondulation dans l'air soit l : cette longueur sera $\frac{l}{n}$ pour la substance interposée (1733). Soit R le rayon de courbure de la lentille ; on aura d'abord $e = \frac{9}{4}\frac{l}{n}$; ensuite, observant que le rayon r

se confond avec la corde AB, un théorème de géométrie donnera $r^2 = 2Re$. Supposons $R = 10^m$; si la substance interposée est de l'air, et si on opère avec la lumière voisine de la raie P (1732), on tirera $e = 0^{mm}001325$ et $r = 5^{mm}14$. Ce résultat s'accorde avec les mesures de Newton; il est d'ailleurs facile de mesurer les diamètres des anneaux, au moyen de divisions gravées sur la lame du verre qui supporte la lentille; de cette manière, l'amplification due à celle-ci est sans influence.

1747. On voit que pour obtenir des anneaux appréciables, il faut que la courbure de la lentille soit d'un très grand rayon. Newton en employait une dont le rayon était de 51 pieds anglais. Les formules précédentes montrent, conformément à l'expérience, que le diamètre des anneaux diminue à mesure qu'on emploie une lumière plus réfrangible; puisqu'alors l devient plus petit. Il diminue aussi quand on interpose un liquide plus réfringent, car il est en raison inverse de n; aussi, en mettant une goutte d'eau entre les verres, on voit les anneaux se rétrécir. Remarques.

1748. Pour les anneaux brillants, les épaisseurs suivent la progression des nombres impairs 1, 3, 5, 7 (1745); or les carrés des diamètres sont comme les épaisseurs (1746), par conséquent *les diamètres des anneaux brillants réfléchis sont comme les racines carrées des nombres impairs.* Pour les anneaux obscurs, la progression est celle des nombres pairs; quant aux anneaux transmis, tout est inverse. Les lois de succession rendent compte du resserrement des anneaux et de leur diminution de largeur à mesure qu'ils s'agrandissent. Loi des diamètres.

La relation que nous venons d'indiquer pour les anneaux simples se vérifie encore assez exactement pour les anneaux composés.

1749. Pour bien apprécier la succession des teintes dans les anneaux colorés, il faut soulever peu à peu la lentille; la tache noire disparaît alors, et tous les anneaux viennent successivement se former près du centre où ils prennent une grande largeur, parce que la courbure varie peu vers ce point. Newton s'est aussi servi des bulles de savon, où les couleurs se présentent exactement dans le même ordre, à mesure que l'épaisseur diminue. Si on souffle une bulle Couleurs des anneaux. Fig. 469.

dans un vase pour la préserver des courants d'air et d'une évaporation trop rapide, on peut la conserver des heures entières en ayant soin de fermer le tube avec un peu de cire. Pendant ce temps, le liquide s'écoule peu à peu vers le bas de la bulle, de sorte que celle-ci s'amincit graduellement à la partie supérieure, et présente une succession d'anneaux horizontaux très larges. Il y a encore plus de régularité avec une bulle hémisphérique soufflée sur un verre plein d'eau de savon qu'on recouvre d'une cloche.

L'ordre des couleurs est constant.

1750. Il est à noter que les couleurs des anneaux de chaque genre se succèdent toujours dans le même ordre ; ainsi les couleurs des anneaux réfléchis à centre noir restent les mêmes quand, au lieu de poser la lentille sur un plan de verre, on la pose sur un plan de résine ou de métal ; le fluide interposé est également sans influence sur la succession des couleurs, tant qu'il ne donne pas des anneaux à centre blanc (1741).

Échelle chromatique des anneaux.

1751. Les anneaux colorés forment une suite de teintes qu'on peut reproduire à volonté, et qui fournissent par conséquent des types précieux de comparaison. Voici, d'après Newton, la série des couleurs des anneaux réfléchis.

ORDRE.	COULEURS RÉFLÉCHIES.	ÉPAISSEUR DES LAMES, en millioniêmes de millimètre. d'air.	d'eau.	de verre.	DÉSIGNATION des COULEURS.
1er	Très noir	13	9	8	
	Noir	25	19	16	
	Commenc. du noir.	51	38	33	
	Bleu	61	46	39	Bleu de ciel blanchâtre.
	Blanc	133	97	86	L'argent mat.
	Jaune	180	135	116	La paille.
	Orangé	202	152	131	Écorce d'orange séchée.
	Rouge	228	171	147	Le geranium sanguineum.
2e	Violet	286	212	182	L'iode.
	Indigo	325	243	207	Indigo.
	Bleu	354	266	228	Bleu de cobalt.
	Vert	383	287	246	Vert d'eau, aigue marine.
	Jaune	412	309	263	Citron.
	Orangé	436	329	281	Orange.
	Rouge éclatant.	464	348	299	Œillets de mai.
	Rouge ponceau.	498	373	320	Rouge de sang.
3e	Pourpre	531	398	296	Fleur de lin.
	Indigo	559	419	361	Indigo.
	Bleu	592	469	382	Bleu de Prusse.
	Vert	638	478	411	Vert de pré.
	Jaune	687	514	443	Jaune blanchâtre, bois blanc.
	Rouge	734	550	473	Rouge de roses.
	Rouge bleuâtre.	810	607	553	Rouge plus pourpre.
4e	Vert bleuâtre.	860	645	557	
	Vert	893	670	576	Vert d'émeraude.
	Vert jaunâtre	911	683	588	
	Rouge	1020	765	658	Rose pâle.
5e	Bleu verdâtre.	1164	873	751	Vert d'eau.
	Rouge	1328	996	860	Rose pâle.
6e	Bleu verdâtre.	1486	1113	961	Vert d'eau léger.
	Rouge	1645	1234	1063	Rose plus pâle.
7e	Bleu verdâtre.	1796	1347	1161	Très pâle.
	Blanc rougeâtre.	1948	1461	1257	Très pâle.

Mesure des lames minces.

1752. Cette table donne l'épaisseur des lames d'air, d'eau et de verre, d'après la couleur qu'elles réfléchissent sous l'incidence perpendiculaire; on voit, par exemple, quelle est l'épaisseur d'une bulle de savon dans les taches noires qui apparaissent quand la bulle est près de crever. Les épaisseurs d'eau et de verre ont été calculées en divisant l'épaisseur d'air par l'indice de réfraction (1746). Les résultats trouvés ainsi pour le verre s'appliquent au mica, l'indice de réfraction étant à très peu près le même. Mais il est

difficile de bien reconnaître les couleurs qui se répètent dans les divers ordres. Notons aussi que, suivant Fresnel, les mesures données par Newton sont un peu trop petites.

Les couleurs transmises sont complémentaires. Fig. 470.

1753. Les anneaux colorés disparaissent complétement quand on tient l'appareil vis-à-vis le milieu d'une surface blanche, de manière à recevoir autant de lumière en dessus qu'en dessous; il est clair qu'alors l'œil reçoit à la fois les rayons réfléchis et les rayons transmis; or, puisque ces rayons recomposent de la lumière blanche, on peut conclure que les couleurs des anneaux transmis sont complémentaires de celles des anneaux réfléchis.

Application à la photométrie.

1754. M. Arago, à qui l'on doit cette expérience, en a tiré un nouveau moyen de comparer l'intensité de deux lumières. Imaginons une feuille de papier demi-transparent dont les deux moitiés soient éclairées par derrière et séparément à l'aide d'écrans convenablement disposés, l'une par une bougie, l'autre par une lampe dont on fera varier les distances jusqu'à ce que les anneaux disparaissent. A ce moment on sera sûr que l'éclairement est le même, et le rapport des carrés des distances donnera le rapport des intensités (1409). Il faut que les deux verres soient de même épaisseur et bien symétriquement placés; on pourra même remplacer le verre plan par une lentille pareille à la première.

Répulsion moléculaire mise en évidence.

1755. Quand on pose une lentille sur une autre on croit naturellement qu'elles se touchent, et cependant cela n'est pas, puisqu'il se manifeste en général des couleurs qui prouvent un certain écartement. Lors même que par la pression l'on a fait disparaître les couleurs et qu'il ne reste plus qu'une tache noire, on ne peut pas encore affirmer qu'il y ait contact, car cette tache, qui subsiste même dans le vide, suppose deux surfaces réfléchissantes distinctes. Quand on échauffe les verres, la tache centrale disparaît, puis à sa place se succèdent les couleurs dans l'ordre de la table (1751), d'où l'on peut conclure qu'il s'établit un écartement de plus en plus grand; à la fin même les couleurs disparaissent, mais on peut les reproduire soit en pressant les verres, soit en les refroidissant. Ces phénomènes manifestent l'existence d'une force répulsive qui s'oppose au con-

tact des corps (107) et qui augmente d'intensité avec la chaleur (913).

1756. Nous dirons maintenant un mot des couleurs et des anneaux colorés qu'on peut produire avec des lames épaisses. Voici d'abord un cas observé par M. Brewster, où les couleurs se produisent à peu près comme avec les lames minces. On applique l'une contre l'autre deux lames de verre de même épaisseur et à faces parallèles en interposant un bout de carte ou un peu de cire d'un côté pour qu'il y ait un intervalle angulaire. Alors, si on regarde une bougie à travers cet appareil, on voit, outre l'image directe, une série d'images par des réflexions multiples, et chacune de ces images latérales est entrecoupée de bandes colorées dues à des interférences. On conçoit, en effet, que les deux rayons A et B, provenant du même point, peuvent avoir des différences de marche assez petites pour interférer. Cette expérience se fait aussi avec une seule lame et un miroir.

Couleurs produites par des lames épaisses. Expérience de Brewster.

Fig. 471.

1757. Newton ayant introduit dans une chambre obscure un faisceau de rayons solaires par une ouverture d'un tiers de pouce de diamètre, et ayant reçu ces rayons sur un miroir concave de verre étamé, de manière à les renvoyer vers l'ouverture qui leur donnait passage, vit se former autour de cette ouverture 4 ou 5 anneaux colorés très distincts quand la distance du miroir était égale à son rayon de courbure. Il est à noter que ces anneaux sont beaucoup plus marqués lorsque la surface du miroir est couverte d'une poussière fine ou d'un enduit léger, et qu'un miroir métallique ne produit pas d'anneaux, à moins qu'on ne mette devant lui une gaze ou quelque corps capable de disséminer une partie de la lumière. D'après cela, considérons sur la surface du verre un point A frappé par la lumière incidente; ce point est également frappé par la lumière réfléchie, et dans les deux cas il rayonne, surtout s'il s'y trouve quelques aspérités. D'ailleurs il faut admettre que dans les deux cas il prend la phase de la lumière qui le traverse, de sorte qu'un rayon AP, dérivé de la lumière réfléchie, se trouve, en partant du point A, dans les mêmes conditions que s'il avait déjà parcouru deux fois l'épaisseur AM du verre; dès lors, si on le compare avec le rayon ANP, dérivé de la lumière incidente, on voit que la différence des chemins par-

Expérience de Newton.

Fig. 472.

cours peut être assez petite pour qu'il y ait interférence. Supposons que cette différence soit d'une demi-ondulation, on aura un point obscur en P, et comme il en est de même tout autour de l'ouverture, il en résultera un anneau sombre; un peu plus loin la différence étant d'une ondulation entière, on aura un anneau brillant, et ainsi de suite. Le miroir, par sa courbure, fait coïncider les systèmes d'anneaux produits par les divers rayons qui composent le faisceau. Un miroir plan ne donnerait que des anneaux insensibles; mais on pourrait concentrer, avec une lentille, les rayons qui les forment; aussi voit-on des anneaux quand on fait l'expérience de Newton avec une glace ordinaire, pourvu qu'on reçoive les rayons dans l'œil. On fait aussi cette expérience avec une bougie qu'on tient près de l'œil, à quelque distance, devant une glace qu'on a légèrement ternie.

Expérience de M. Babinet.

1758. M. Babinet a obtenu des anneaux analogues à ceux de Newton en mettant une lame de verre sur le trajet des rayons qui allaient se rassembler au foyer d'une lentille; il faut que les surfaces soient ternies ou couvertes d'un peu de poussière. On peut remplacer la lame épaisse de verre par deux lames minces de mica, AB, CD; un rayon quelconque MF forme deux points lumineux LL' à la rencontre des surfaces; si on prend un point O, tel que $L'O - LO = \frac{1}{2}$ ondulation, on voit qu'il y aura interférence, car le rayon dérivé L'O ayant la phase qu'a le rayon MF en L', il peut être considéré comme émanant du point L. Chacun des points voisins du foyer reçoit ainsi une infinité de doubles rayons que le calcul démontre être simultanément tous d'accord ou tous en opposition deux à deux, suivant la distance à l'image focale; telle est l'origine des anneaux. Le cas de Newton rentre dans celui-ci en imaginant que les points rendus rayonnants par la lumière réfléchie sont séparés des autres et transportés derrière le miroir.

Fig. 473.

§ 111. *Diffraction de la lumière; phénomènes des réseaux.*

Ce que c'est que la diffraction.

1759. On appelle *diffraction* une modification qu'éprouve la lumière quand elle rase le bord des corps ou quand elle

passe par des ouvertures étroites; elle se disperse alors et paraît même ne plus se propager en ligne droite. On a cru long-temps que la diffraction était due à une action des corps sur la lumière; mais dans la réalité les corps n'agissent qu'en arrêtant une portion des ondes lumineuses; le reste alors produit des phénomènes particuliers.

1760. Pour avoir un exemple de diffraction, il suffit de regarder une bougie ou le soleil à travers une fente très étroite placée contre l'œil; alors, outre l'image directe, qui paraît plus ou moins élargie, on voit une série d'images irisées avec le rouge en dehors, et qui s'étendent très loin. Avec un verre coloré, on a de chaque côté de l'image des bandes alternativement noires et lumineuses. On ne voit plus qu'une bande lumineuse indéfinie perpendiculaire à la fente quand celle-ci est extrêmement étroite. En adaptant la fente au volet d'une chambre obscure, on peut recevoir sur un tableau les franges de diffraction produites par le soleil; la fente peut se faire par une simple incision avec un canif dans une feuille d'étain collée sur du verre; mais il est plus commode de se servir de l'appareil de Sgravesande dans lequel les deux bords de la fente sont formés par deux plaques, dont l'une, P, marche parallèlement à elle-même, et d'une quantité connue à l'aide d'une vis micrométrique V, tandis que l'autre reste fixe ou s'incline à volonté en tournant sur le centre C quand on pousse une seconde vis v. En formant ainsi une fente angulaire on a des franges divergentes. Mais il est à remarquer que la partie la plus large de l'image répond à la partie la plus étroite de la fente.

Exemple. Franges extérieures des petites ouvertures.

Fig. 474.

Fig. 475.

Fig. 476.

1761. On peut se rendre compte des principaux phénomènes de la diffraction en combinant le principe des interférences avec un autre principe dérivé aussi de la nature de la lumière, et dont la première idée appartient à Huygens. Ce principe peut s'énoncer ainsi: *L'éclairement produit par une source de lumière est identique avec celui que produirait une onde émanée de cette source, chacun des points de cette onde étant considéré comme un point lumineux.* L'onde par laquelle on remplace la source est prise dans une partie quelconque de ses positions avant qu'elle ait atteint le point dont on considère l'éclairement.

Théorème d'Huygens.

Comment une onde éclaire un point.

1762. Pour voir comment une onde lumineuse éclaire un point, nous considérerons seulement le cas d'une onde circulaire, cela suffit pour donner une idée de ce qui arrive avec une onde sphérique; nous supposerons d'ailleurs la lumière homogène. Soit donc une onde OAO; il est évident que nous n'avons à nous occuper que de la partie comprise entre la source S et le point éclairé P, puisque le mouvement qui constitue la lumière ne rétrograde pas; et même, comme tout est symétrique par rapport à la droite SP qui joint la source au point éclairé, il nous suffit d'examiner ce qui a lieu d'un seul côté de cette droite. A partir de la ligne de symétrie, divisons l'onde en arcs AB, BC, CD, etc., tels qu'il y ait une demi-ondulation de différence entre les distances du point éclairé P à deux divisions consécutives; nous appellerons désormais *éléments d'interférence* les portions de l'onde ainsi décomposée. Les vibrations étant à l'unisson dans tous les points d'une même circonférence, il s'ensuit que le rayon BP interfère avec le rayon AP, et que de même chacun des rayons de l'élément BC interfère avec un de ceux de l'élément AB; mais ce dernier étant plus grand que l'autre, son effet est loin d'être entièrement détruit. La destruction est bien plus complète entre le troisième et le quatrième élément, le cinquième et le sixième, car la différence de longueur va toujours en diminuant. On voit d'après cela que la lumière s envoyée vers un point par la moitié de l'onde arrivante est une somme à termes décroissants, alternativement positifs et négatifs, de sorte que si, pour fixer les idées, on représente par $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$, les quantités de lumière envoyées par les éléments successifs, on aura $s = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4}$, etc. Une analyse exacte montre que les premiers termes de cette série ont seuls de l'importance, et que l'éclairement dû à de la demi-onde revient à celui que donnerait un point lumineux placé très près de la ligne de symétrie. On conçoit d'après cela qu'il ne doit pas y avoir d'interférence avec l'autre moitié de l'onde arrivante, et que l'éclairement total peut être représenté par $2s$.

Fig. 477.

Éléments d'interférence.

Diffraction par le bord d'un écran.

1763. Supposons maintenant qu'on se soit procuré un point lumineux F dans une chambre obscure, comme pour l'expérience des interférences (1721), et qu'on ait placé un écran AB de manière à arrêter la moitié des rayons. Alors

Fig. 478.

on verra sur un carton blanc MN que l'ombre PM est bordée de 3 ou 4 franges PN irisées très délicates, dont la première est beaucoup plus large et plus marquée que les autres; on remarquera, en outre, que la lumière pénètre dans l'ombre géométrique, où elle devient insensible à une très petite distance. Ces phénomènes se voient mieux à la loupe, comme une image aérienne (1721). Dans ce cas, avec une lumière homogène, on compte jusqu'à 6 ou 7 franges, dont chacune se compose d'une bande brillante et d'une bande, non pas noire comme dans l'expérience des interférences, mais seulement sombre; de sorte qu'on n'a réellement que des maxima et des minima de lumière. Quand le bord n'est pas rectiligne, les franges s'infléchissent et suivent tous ses contours.

On fait très bien ces expériences avec la lumière artificielle en plaçant devant une lampe une large plaque percée d'un très petit trou ou d'une fente d'un demi-millimètre de large et de deux ou trois centimètres de long; à un mètre à peu près on fixe une loupe L d'un pouce de foyer, et dans l'intervalle on promène une règle ou une carte PM dont on tient le bord PP bien parallèle à la fente; les franges alors se manifestent; elles sont d'autant plus étroites que la règle est plus près de la loupe; à 2 ou 3 décimètres elles sont très visibles.

1764. Les maxima et les minima de clarté qui constituent les franges proviennent de ce qu'en s'écartant du bord de l'écran on découvre des éléments de l'onde qui, alternativement, donnent et détruisent de la lumière. En effet, chaque point P′, P″, situé hors de l'ombre géométrique, reçoit d'un côté la lumière d'une demi-onde et de l'autre celle d'un arc A′A, A″A, qui varie selon la distance. Si le point P′ est tel que AP′ — A′P′ = 1 demi-ondulation, il n'y a pas d'interférence, et la clarté en P′ est un maximum; car dès qu'on se rapproche de l'ombre, on découvre un arc moindre que A′A, et dès qu'on s'éloigne on a des interférences. De P″, au contraire, en supposant que AP″—A″P″ = 2 demi-ondulations, on découvre deux éléments qui interfèrent; si on s'éloigne, on reçoit plus de lumière; si on se rapproche, il y a moins d'interférences; de sorte que P″ est bien en minimum. En continuant ce rai-

Comment il se produit des franges.

sonnement, on voit que les maxima et les minima de lumière répondent aux points dont la distance à l'écran surpasse la distance à l'onde d'un nombre entier de demi-ondulations, ce nombre étant pair pour les minima et impair pour les maxima. Dans l'exemple que nous avons supposé (1762), la clarté pour les maxima et les minima successifs serait $s+1$, $s+1-\frac{1}{2}$, $s+1-\frac{1}{3}+\frac{1}{4}$, etc.; on reconnaît que les différences s'effacent à mesure qu'on s'écarte du bord P de l'ombre géométrique. Il suffirait d'une construction pour s'assurer que les intervalles doivent aller en diminuant; il est évident d'ailleurs qu'ils doivent être plus grands pour les couleurs dont les ondulations sont plus grandes, ce qui explique la coloration des franges quand on opère avec la lumière composée.

Comment la lumière pénètre dans l'ombre.

1765. On conçoit très bien que la moitié de l'onde qui n'est pas arrêtée doit envoyer de la lumière dans l'ombre géométrique; cette lumière doit aller en diminuant, à cause de l'obliquité; car si on décompose la demi-onde en éléments d'interférence par rapport à des points, tels que M, de plus en plus éloignés du bord de l'ombre, on reconnait que les premiers éléments eux-mêmes approchent de plus en plus de l'égalité, de sorte que les séries qui représentent la lumière reçue par les différents points ont des valeurs de plus en plus faibles.

Diffraction par un corps étroit.

1766. Quand on remplace l'écran par un corps étroit, comme un fil métallique, une épingle, etc., on voit le long de chaque bord des franges qui diffèrent peu de celles que nous venons d'étudier; mais, en outre, la lumière pénètre des deux côtés dans l'ombre, qui peut se trouver ainsi très fortement éclairée; et à une certaine distance, il se produit des franges dans cette ombre, les deux portions de l'onde à droite et à gauche faisant alors à peu près l'effet des deux points lumineux dans l'expérience de Fresnel (1721). De près les franges sont très serrées; elles s'élargissent et deviennent moins nombreuses à mesure qu'on s'éloigne. La loupe étant toujours à un mètre de la fente (1763), on voit très bien quatre ou cinq lignes noires dans l'ombre d'une aiguille épaisse d'un demi-millimètre, placée à 2 décamètres de la loupe; on peut remarquer que ces lignes sont plus larges vers la pointe de l'aiguille, ce qui montre

Fig. 462.

que pour une même distance les franges sont d'autant plus larges que le corps est plus étroit. Quand, au lieu d'une fente, on a un point lumineux, on obtient des franges en forme d'anneaux avec un petit disque opaque collé sur une lame de verre ; le centre, qui répond à la ligne moyenne, est un point brillant, de sorte qu'on croirait le disque percé, surtout quand les anneaux ne se voient pas encore. Ce phénomène s'observe, par exemple, avec une tache d'encre bien noire sur une lame de verre : en supposant que la tache ait un millimètre et qu'elle soit à un mètre du point lumineux, on verra un point brillant au milieu de son ombre avec la loupe placée à deux décimètres.

Les franges extérieures, quand elles sont peu distinctes, se confondent avec l'ombre, qui à cause de cela paraît très large. Ainsi Newton ayant placé un cheveu de $\frac{1}{280}$ de pouce à 12 pieds du point lumineux, a trouvé que son ombre avait, à 10 pieds de distance, une largeur de $\frac{1}{6}$ de pouce ; l'ombre géométrique n'aurait eu cette largeur qu'à 420 pieds.

Diffraction par une ouverture étroite. 1° Franges intérieures. Fig. 479.

1767. Supposons maintenant qu'on ait deux écrans indéfinis se rapprochant graduellement de manière à donner une fente de plus en plus étroite (1760). A un certain moment les franges des bords se toucheront et formeront ce qu'on appelle les *franges intérieures*. Celles-ci, d'abord pâles, surtout au milieu, se renforcent et deviennent moins nombreuses à mesure que la fente diminue. Comme on le conçoit, pendant ce mouvement le milieu de la fente est alternativement une ligne obscure et une ligne lumineuse. C'est une ligne obscure quand il y a de chaque côté deux éléments qui interfèrent, ou en général un nombre pair d'éléments. Avec une fente angulaire on peut voir à la fois dans la largeur une ligne obscure vers le sommet de l'angle, et huit ou dix autres en allant vers la base. Les franges intérieures sont très visibles en mettant la loupe à un mètre de la ligne lumineuse, et une fente d'un millimètre à un décimètre de la loupe. Lorsqu'on éloigne celle-ci par degrés, le nombre des lignes sombres diminue, comme quand on rétrécit la fente. En remplaçant la ligne lumineuse par un point et la fente par une petite ouverture circulaire, les franges se disposent en cercles concentriques, et le centre est alternativement un point sombre ou brillant, suivant la

distance de la loupe oculaire. Un trou d'épingle d'un millimètres environ dans une feuille d'étain, étant placé à 75 centimètres du point lumineux, donne un point noir lorsque la loupe est à 25 centimètres; si on éloigne la loupe, les cercles se développent.

2° Franges extérieures.

1768. A force de rétrécir la fente, on finit par faire passer les franges dans l'ombre; on commence à les y distinguer lorsqu'il ne reste plus que 2 ou 3 franges intérieures. Elles s'élargissent ensuite beaucoup et s'étendent presque indéfiniment. Il est à remarquer qu'elles se voient mieux à l'œil nu, l'œil étant appliqué tout contre la fente; on retrouve de cette manière les phénomènes que nous avions cités comme exemples de diffraction (1760); mais ils sont plus réguliers, parce que le corps éclairant est une ligne lumineuse très étroite; avec une petite ouverture circulaire et un point lumineux on a des franges extérieures en anneaux.

Pourquoi elles s'élargissent quand l'ouverture se rétrécit.

Fig. 180.

1769. Pour nous rendre compte de l'élargissement des franges lors du rétrécissement de la fente, rappelons-nous que la largeur d'une frange est égale à l'intervalle de deux maxima de lumière, et que pour passer d'un maximum P′ à un autre P″, il faut que la différence BP′ — AP′ s'accroisse de la longueur d'une ondulation; or, quand l'ouverture est petite, ces droites ayant à peu près la même position, elles s'accroissent presque de la même quantité, à moins que le déplacement ne soit très considérable.

Pourquoi une fente étroite donne plus de lumière dans l'ombre.

1770. Un autre phénomène remarquable pendant la production des franges extérieures, c'est que la lumière pénètre d'autant plus loin dans l'ombre géométrique que la fente est plus étroite. Cela se conçoit quand on observe que la lumière envoyée en un point par une onde peut très bien diminuer par des interférences quand on augmente le nombre des éléments (1762). En effet, soit a cette lumière pour un maximum dans le cas d'un seul élément; si on découvre les deux éléments suivants, la lumière reçue pourra être représentée par $a - \frac{a}{2} + \frac{a}{3}$, quantité plus petite que a, et il y aura toujours ainsi diminution, puisque, d'après la nature de la série qui représente la lumière reçue, la quantité qu'on ajoute est toujours négative.

Diffraction

1771. Lorsqu'on emploie deux fentes très rapprochées,

les deux systèmes de franges extérieures se superposent dans la partie moyenne, et il en résulte des bandes qu'il ne faut pas confondre avec les franges d'interférence dues aux deux portions de l'onde agissant comme des points lumineux. Les franges extérieures se voient d'aussi près qu'on veut; elles peuvent avoir leur bande moyenne sombre; les bandes d'interférence, au contraire, ne se voient qu'à une grande distance des ouvertures, et leur bande moyenne est toujours une bande lumineuse; on peut d'ailleurs observer à la fois ces deux ordres de franges. Aussi, avec deux fentes de $\frac{1}{4}$ millimètre, séparées par un intervalle de 2 millimètres et placées à un mètre d'une ligne lumineuse donnée par une lampe, on ne commence à bien voir les franges d'interférence qu'à un mètre et demi des fentes; elles sont superposées aux autres, mais beaucoup plus fines; il faut dans cette expérience employer une loupe de 2 ou 3 pouces de foyer. par deux ouvertures étroites.

1772. C'est en étudiant la diffraction produite par deux ouvertures étroites que Grimaldi, dès 1665, a entrevu le phénomène de l'interférence. Ayant fait deux petits trous au volet d'une chambre obscure, il reçut à une grande distance, sur un carton blanc, deux images circulaires qui se superposaient en partie; il vit bien qu'il y avait addition de lumière dans le segment commun, mais il remarqua aussi que les arcs qui terminaient ce segment étaient d'une obscurité prononcée, quoiqu'ils reçussent plus de lumière que le reste de la circonférence dont ils faisaient partie. Ainsi, dit-il, le carton, vers les bords du segment, est moins éclairé par les deux trous que par un seul, et par conséquent de la lumière ajoutée à de la lumière peut produire de l'obscurité. Expérience de Grimaldi.

1773. Lorsqu'on regarde une étoile brillante avec une lunette ou un télescope, grossissant 3 ou 400 fois, l'étoile prend un disque sensible, et elle est entourée d'anneaux légèrement colorés. En enfonçant graduellement l'oculaire, le centre du disque paraît alternativement noir et brillant, et des anneaux intérieurs se développent comme avec les ouvertures étroites. Quand l'étoile est scintillante et que le centre du disque est un point noir, on voit de temps à autre ce centre devenir momentanément brillant. Si on ré- Diffraction dans les lunettes.

trécit l'ouverture de l'instrument par un diaphragme, le disque et les anneaux extérieurs s'élargissent; suivant la forme du diaphragme, l'image de l'étoile présente des apparences très variées, par exemple, avec une ouverture triangulaire; l'image qui reste circulaire est accompagnée de six rayons régulièrement placés. On n'a pas encore donné la théorie de ces phénomènes.

Diffraction dans les microscopes.

1774. Il y a dans le microscope, comme nous l'avons dit (1556), des franges très vives autour des images quand on opère avec une forte lumière, et un grossissement considérable; il paraît, d'après M. Dujardin, qu'on peut les éviter en faisant tomber très exactement sur l'objet le foyer de la lentille et du miroir d'éclairage, qui doit alors être une glace parallèle. Pour s'assurer de la coïncidence, on choisit une mire éloignée dont l'image, réfléchie par le miroir, se trouve peinte sur le porte-objet, et en quelque sorte superposée à l'objet lui-même; puis, en inclinant davantage le miroir, on prend la lumière du ciel.

Diffraction par les réseaux parallèles.

1775. On entend par *réseaux*, en optique, des assemblages très serrés de parties opaques et de parties transparentes. Nous examinerons d'abord les réseaux réguliers, qu'on obtient en gravant au diamant sur le verre des traits parallèles et également espacés; les traits, dans ce cas, forment les parties opaques. Quand on regarde une bougie à quelques mètres de distance, à travers un réseau de ce genre, contenant une dizaine de traits par millimètre, outre l'image directe, qui est incolore, on voit à droite et à gauche, perpendiculairement à la direction des traits, une série d'images colorées qui s'élargissent et se superposent à mesure qu'elles s'écartent, de sorte que les dernières forment une bande indéfinie de lumière blanche. Avec des réseaux de 50 ou 100 traits par millimètre, les images sont de véritables spectres; ces spectres ont le rouge en dehors et le violet en dedans. Entre l'image directe, qui reste toujours incolore, et le premier spectre, de chaque côté il y a un grand intervalle sans lumière; l'intervalle est moins grand entre le premier et le deuxième spectre; les autres se superposent de plus en plus. Le réseau de 100 traits donne pour le premier spectre à peu près la même dispersion qu'un prisme de flint-glass de 60°, mais le rouge et le jaune ne sont pas contractés; le

bleu et le violet ne sont pas dilatés, comme dans le cas de la réfraction; les différentes couleurs occupent des longueurs à peu près égales, ce qui donne aux spectres des réseaux un aspect tout particulier. En employant une ligne lumineuse, on a des couleurs assez pures pour qu'à l'aide d'une lunette on puisse voir les principales raies (1631), surtout avec la lumière solaire. La figure 480 donne une idée des spectres des réseaux observés ainsi par Fraunhofer; A est la ligne lumineuse; B B sont les deux premiers intervalles obscurs; C C les deux premiers spectres; D D deux autres intervalles obscurs; viennent ensuite les spectres confondus. Avec la lumière de l'alcool salé (1637), ou bien un verre rouge, on aperçoit seulement des bandes lumineuses équidistantes séparées par des intervalles obscurs. Tous ces phénomènes, qu'on observe en tenant le réseau contre l'œil, peuvent aussi se peindre sur un tableau quand on place le réseau dans un rayon de lumière solaire. **Fig. 480.**

Lois de Fraunhofer.

1776. Soit D_n la déviation d'une raie donnée dans le n^e spectre, c'est-à-dire l'angle compris entre deux droites partant de l'œil pour aller, l'une à la fente lumineuse, l'autre à la raie en question; soit l la longueur d'ondulation de la lumière voisine de la raie, S le nombre de traits par millimètre dans le réseau employé, on a, d'après les mesures de Fraunhofer, $\sin. D_n = n l S$.

On peut couclure de cette formule, du moins quand la déviation est assez petite pour que le sinus se confoude avec l'arc, 1° que la déviation pour chaque couleur est proportionnelle à sa longueur d'ondulation; 2° que les centres des spectres sont équidistants; 3° que leurs longueurs sont comme les nombres 1, 2, 3, 4; 4° que pour les différents réseaux la déviation et la dispersion d'un spectre donné sont proportionnelles au nombre de traits par millimètre.

Explication des phénomènes. **Fig. 481.**

1777. Pour expliquer ces phénomènes, considérons un réseau A B, contre lequel arrive une onde de lumière homogène que nous diviserons en éléments d'interférence (1762) par rapport au point P où l'œil est placé. Appelous *élément* du réseau la somme d'un intervalle transparent et d'un trait opaque; on conçoit qu'en s'écartant de la ligne de symétrie, on rencontrera une position, où un élément BC du réseau couvrira sensiblement un élément de l'onde; dans ce

cas, les rayons arrêtés par un trait étant ceux qui interféraient avec les rayons arrêtés par le trait voisin, le réseau est sans influence pour faire arriver à l'œil la lumière de cette partie de l'onde. Mais plus loin on tombe sur une position où un élément EF du réseau couvre deux éléments de l'onde, puisque ceux-ci vont en diminuant; alors le trait opaque arrêtant des rayons qui interféraient avec ceux que laisse passer l'intervalle transparent, ces derniers deviennent nécessairement efficaces. Au delà, les mêmes phénomènes se reproduisent, c'est-à-dire qu'on a des minima et des maxima de lumière alternatifs, suivant que l'élément du réseau couvre un nombre pair ou impair d'éléments d'interférence; vis-à-vis la ligne lumineuse, et des deux côtés, jusqu'à une certaine distance, chacun des éléments du réseau ne couvre qu'une petite fraction, ou tout au plus un des éléments de l'onde, d'où il suit que les choses doivent se passer à peu près comme s'il n'y avait pas de réseau.

Il est évident que les maxima de lumière n'occupent pas les mêmes positions, si la longueur d'ondulation devient différente; voilà pourquoi les couleurs de la lumière composée se séparent; on voit même, par l'explication précédente, que la distance d'un maximum à la ligne lumineuse doit augmenter avec la longueur d'ondulation, ce qui rend compte de la position du rouge au dehors et du violet en dedans.

Théorie des lois. 1778. Maintenant, pour retrouver la formule que Fraunhofer a donnée, cherchons la déviation du premier maximum de lumière; soit BC l'élément du réseau; si du point P, comme centre, on décrit l'arc BD, on aura $CD = l$, l étant la longueur d'une ondulation. Comme les rayons efficaces sont compris dans l'angle très petit BPC, on peut prendre CP pour la direction de ces rayons, de sorte que l'angle cherché est APC. Or, $\sin. APC = \frac{AC}{PC} = \frac{CD}{BC}$, car BD étant sensiblement une droite perpendiculaire à DC, les triangles ACP et BCD sont semblables. Actuellement, soit S le nombre de traits par millimètre BC sera $\frac{1}{S}$, et on aura sin. APC ou $\sin. D = lS$; pour le second maximum on aurait $\sin. D_2 = 2\,lS$, et en général pour le n^e maximum $\sin. D_n = n\,lS$.

Fig. 482.

1779. C'est Fraunhofer qui a étudié le premier les phénomènes produits par les réseaux parallèles, et qui en a déterminé les lois; on doit à M. Babinet l'explication que nous avons donnée; il serait facile de modifier cette explication pour le cas où les spectres seraient reçus sur un tableau. Remarques.

Comme le montre la formule, les largeurs relatives du trait opaque et de l'intervalle transparent n'ont pas d'influence sur la déviation; mais ces largeurs influent sur la quantité de lumière. Il est évident, par exemple, que si elles étaient égales, le premier maximum enverrait toute la lumière d'un élément, tandis que le deuxième n'en enverrait pas du tout; en général, si une des largeurs est une partie aliquote $\frac{1}{n}$ de leur somme, le spectre de l'ordre n disparaît.

1780. La formule des réseaux donne une mesure très exacte des longueurs d'ondulation, car S est très bien connu, et D_n peut se mesurer avec beaucoup d'exactitude à l'aide d'un théodolite, d'un sextant, ou par des triangles; c'est au moyen des réseaux qu'on a mesuré la longueur d'ondulation pour les différentes raies (1732), pour la flamme de l'alcool salé, etc. Mesure des longueurs d'ondulation.

1781. On observe dans un grand nombre de cas des phénomènes analogues à ceux que viennent de nous présenter les réseaux parallèles; les barbes de plume des très petits oiseaux donnent des spectres vivement colorés; un peu de matière grasse, étendue avec le doigt sur un verre, forme des stries perpendiculairement auxquelles on voit une bande indéfinie de lumière presque blanche produite par les spectres confondus; avec des stries dans deux, dans trois directions, on a des *astéries*, ou étoiles à 4 ou 6 branches. Fraunhofer, en rayant régulièrement une couche mince de matière grasse, a reproduit tous les phénomènes des réseaux parallèles. M. Babinet a montré que dans un grand nombre de cristaux la structure lamellaire ou striée pouvait se reconnaître à ce que ces substances produisaient les effets des réseaux. C'est par la structure fibreuse du saphir, du grenat, etc., qu'il a expliqué les *astéries*, ou étoiles, qu'on voit en regardant une bougie à travers ces pierres. Réseaux divers.

Anneaux colorés des réseaux.

1782. Avec des réseaux entrecroisés, les spectres se formant dans toutes les directions autour du point lumineux, il en résulte des anneaux colorés; c'est comme si la bande produite par les réseaux parallèles tournait autour de son milieu; on voit de ces anneaux en regardant une bougie à travers des ailes de mouche, des ailes de papillon dépouillées de leur poussière, des toiles d'araignées, des rubans très serrés, des flocons de laine fine, de poil de lièvre, etc.; les anneaux sont d'autant plus larges que les fils sont plus fins.

Réseaux de globules.

1783. Les réseaux formés de grains réguliers très fins donnent des anneaux colorés très remarquables. On en voit trois ou quatre en regardant une bougie à 2 ou 3 mètres de distance, à travers une lame de verre qu'on a passée dans de la poudre de lycopode après l'avoir légèrement humectée avec l'haleine ou une très petite quantité d'essence de térébenthine. M. Delezenne s'est assuré que les distances de ces anneaux suivent les mêmes lois que les distances des spectres dans les réseaux parallèles. Il a reconnu aussi que leur diamètre reste le même, quoique les grains soient plus ou moins serrés; seulement la lumière varie : elle est à son maximum quand les globules se touchent; de sorte que les parties transparentes, dans cette espèce de réseaux, sont probablement les espaces triangulaires qui restent entre les globules, quand ils sont aussi serrés que possible; il paraît que les autres intervalles varient trop pour donner lieu à des anneaux sensibles. Un fait remarquable, c'est que l'aire du premier anneau est éclairée; cela tient sans doute à la distribution irrégulière des parties opaques, car on retrouve un phénomène analogue avec les réseaux parallèles mal faits, l'intervalle entre la ligne lumineuse et le premier spectre paraît éclairé quand les traits sont irrégulièrement espacés. D'ailleurs on conçoit que des parties opaques isolées ou irrégulièrement distribuées, doivent détruire les interférences naturelles de l'onde et laisser arriver une quantité sensible de lumière, si leur diamètre et leur nombre sont assez considérables. Avec des grains plus égaux que ceux du lycopode, l'aire du premier anneau est obscure; c'est, par exemple, ce qui arrive avec les globules de la carie du ble, ou ceux du *lycoperdon cervinum*; leur régularité est telle qu'on peut voir jusqu'à 5 ou 6 anneaux.

1784. Les anneaux donnés par les réseaux de globules sont d'autant plus grands que les globules sont plus petits; cela se conçoit, puisque la déviation augmente à mesure que le réseau est plus serré (1776) et que les globules, pour former des réseaux efficaces, doivent être à peu près en contact. Il résulte d'un grand nombre d'expériences comparatives que le diamètre des anneaux est en raison inverse du diamètre des globules; ainsi, par exemple, les globules de la carie du blé, dont le diamètre est de 14 millièmes de millimètre, donnent des anneaux doubles de ceux que forme le *lycoperdon cervinum*, dont les grains ont 28 millièmes de millimètre. Quoique cette règle soit seulement empirique, on peut très bien s'en servir pour calculer approximativement les diamètres des globules, parce qu'elle a été soumise à des vérifications nombreuses. Mesure des globules.

On peut aussi employer la formule

$$d = 0{,}8\,\frac{l}{\sin.\,D}$$

d est le diamètre du globule, l la longueur d'ondulation pour la couleur que l'on considère, et D l'angle sous-tendu par le demi-diamètre du premier anneau de cette couleur. Ainsi, avec le lycopode et un verre rouge, donnant $l = 0^{mm},000630$, on trouve $D = 1°\,3'\,40''$, d'où $d = 0^{mm},0272$, et c'est en effet le diamètre moyen des globules du lycopode. M. Delezenne, à qui l'on doit cette formule, a constaté qu'elle se vérifiait aussi pour les réseaux de fils très fins; cela justifie l'emploi de l'*ériomètre*, instrument que Young a proposé pour la mesure des laines, d'après le diamètre des anneaux formés par un flocon de cette substance.

1785. Les gouttelettes d'eau et les globules de vapeur vésiculaire peuvent former de véritables réseaux, et c'est de là que proviennent les couronnes autour des astres (1714). Une lame de verre, ternie par de la vapeur d'eau condensée, donne des anneaux colorés quand on regarde de loin une bougie à travers; le phénomène est plus durable avec deux lames très rapprochées, entre lesquelles on a soufflé légèrement. Les couronnes n'étant ainsi que les anneaux colorés des réseaux formés par les nuages, on conçoit que leur diamètre Origine des couronnes.

doit varier avec celui des vésicules aqueuses, et qu'une grande couronne indique des vésicules plus petites. On peut même appliquer ici les méthodes de mesure que nous indiquions tout-à-l'heure. Si, avec un verre dont la moitié seulement est saupoudrée de lycopode, on reconnaît que le diamètre du deuxième anneau est égal au diamètre de la première couronne, c'est que les vésicules aqueuses ont un diamètre moitié de celui des grains de lycopode, c'est-à-dire de 14 millièmes de millimètres environ. Cette mesure des vésicules aqueuses est un nouvel élément de météorologie, les chances de pluie devant en général diminuer à mesure que les vésicules sont plus petites.

M. Delezenne, par un grand nombre de mesures, a trouvé que le diamètre des globules qui produisent les couronnes variait environ depuis 8 jusqu'à 25 millièmes de millimètre.

Diffraction par réflexion.

1786. La lumière, en se réfléchissant, reproduit tous les phénomènes de diffraction que nous avons vus se manifester avec la lumière transmise; et cela se conçoit, puisque d'après les lois de la réflexion, la marche des rayons est la même que si la source lumineuse était placée derrière la surface réfléchissante, qui serait devenue transparente. On se rend compte ainsi des couronnes vues par réflexion (1715) et des vives couleurs réfléchies par les réseaux, ou en général par les surfaces striées. On a fabriqué des boutons dits *à l'arc-en-ciel* qui devaient leurs reflets irisés à des réseaux très fins imprimés sur le cuivre par une matrice d'acier. Sir Brewster a montré que les couleurs de la nacre étaient dues aux stries d'accroissement de la coquille, et qu'elles se transmettaient à la cire ou à toute autre substance qui prenait l'empreinte des stries. Le même physicien a reconnu que le cristallin des poissons et de certains animaux était formé de fibres extrêmement fines qui réfléchissaient les spectres des réseaux; et par la disposition des spectres il a déterminé l'arrangement ainsi que les dimensions de ces fibres.

Les effets de lumière et les couleurs que produit un fil d'araignée au soleil, ou une raie gravée sur un métal, sont des phénomènes de diffraction qui se rapportent à ceux des ouvertures étroites; seulement on a de la lumière réfléchie au lieu de lumière transmise.

CHAPITRE VII.

THÉORIE DE LA PROPAGATION, DE LA RÉFLEXION ET DE LA RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

1786. Deux systèmes ont été proposés pour expliquer les phénomènes de la lumière. Dans *le système de l'émission*, l'on suppose que les corps lumineux lancent des molécules excessivement ténues qui pénètrent dans l'œil et y produisent la sensation de la lumière : suivant la nature des molécules, on a la sensation de telle ou telle couleur. La réflexion dans ce système est due à une répulsion qu'éprouvent les molécules lumineuses près de la surface des corps; la réfraction au contraire provient d'une attraction qui, étant différente pour les molécules de différentes couleurs, occasionne la décomposition de la lumière ou la dispersion. Une conséquence remarquable de cette théorie, c'est que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans les milieux plus réfringents puisque leur attraction est plus forte. Pour expliquer comment à la rencontre d'un milieu une partie de la lumière pénètre, tandis qu'une autre partie se réfléchit, on admet que les molécules lumineuses peuvent se présenter dans des états différents qu'on appelle *accès de facile réflexion* et *accès de facile transmission ;* les unes alors sont attirées et les autres sont repoussées. En imaginant que ces accès se succèdent périodiquement pour chaque molécule, on rend compte des couleurs des lames minces et de la formation des anneaux colorés. Quant aux phénomènes d'interférence, de diffraction, de polarisation et de double réfraction, jamais on n'en a donné d'explication bien satisfaisante dans ce système qui a été soutenu par Newton, mais à une époque où l'optique n'avait pas à beaucoup près l'étendue qu'elle offre aujourd'hui. Système de l'émission.

1787. Dans le *système des ondulations* qui a été suivi par Descartes, Huygens, Euler, Young, Fresnel, et qui est généralement adopté aujourd'hui, la lumière est produite par Système des ondulations. Production de la lumière.

un mouvement vibratoire de l'éther. En quoi ce mouvement diffère-t-il de celui qui produit la chaleur? c'est ce qu'on ne sait pas encore d'une manière positive. Cependant pour fixer les idées nous admettrons, en suivant les analogies, que dans le cas de la lumière, l'éther qui entoure les atomes pondérables vibre dans toutes ses parties, tandis que dans le cas de la chaleur il est emporté tout d'une pièce dans la vibration des atomes eux-mêmes (1366). Dans cette manière de voir on conçoit que les mouvements qui produisent la chaleur et la lumière peuvent exister ensemble ou séparément; on conçoit aussi qu'ils s'établissent l'un par l'autre quand l'amplitude des vibrations est très considérable, ce qui rend compte de la production de lumière dans les hautes températures (1831) et dans le cas de phosphorescence par la chaleur (1383); on s'explique également la transformation de la lumière en chaleur (1301) et comment ces deux effets naissent ordinairement des mêmes causes (1379).

Il est bien probable que les vibrations calorifiques sont moins rapides et ont plus d'amplitude que les vibrations lumineuses. On peut dire qu'elles sont aux vibrations lumineuses ce que les vibrations pendulaires sont aux vibrations sonores. Ce qui légitime encore cette analogie, c'est que les vibrations calorifiques excitent dans l'éther, comme les vibrations pendulaires dans l'air, des mouvements que nous pouvons sentir par tous nos organes; tandis que les vibrations lumineuses de même que les vibrations sonores ne peuvent être senties que par des organes spéciaux.

Production des couleurs.

1788. Les différentes espèces de lumière ou les couleurs dépendent de la rapidité plus ou moins grande des vibrations; soit v la vitesse de propagation (1397), l la longueur d'une ondulation, $\frac{v}{l}$ sera le nombre de vibrations par seconde (1733); on voit que ce nombre est d'autant plus grand que la lumière est plus réfrangible; ainsi pour produire le violet il faut des vibrations plus rapides que pour produire le rouge. Dans tous les cas les vibrations sont d'une inconcevable rapidité; pour le vert par exemple, le nombre des vibrations par seconde est d'environ 600 millions de millions. Il faut d'ailleurs une différence de plusieurs millions de millions pour occasionner une différence de nuance ap-

préciable. Il est évident que les couleurs composées dépendent non seulement de la rapidité des vibrations, mais aussi de la manière dont ces vibrations se superposent. Quant à la perception de telle ou telle couleur, elle dépend des causes physiques que nous venons de signaler et de l'état de l'organe (1670). On doit naturellement admettre que les différentes espèces de chaleur (1265) dépendent aussi de la rapidité plus ou moins grande des vibrations calorifiques.

1789. Lorsqu'un point de l'éther est le siége d'un mouvement vibratoire, l'ébranlement se propage dans les couches environnantes avec le caractère du mouvement par ondes, c'est-à-dire que chaque couche transmet tout son mouvement à la couche suivante, de sorte qu'elle rentrerait immédiatement en repos si l'ébranlement originaire ne continuait pas. Les phénomènes de la *polarisation* conduisent à admettre que pour la propagation des mouvements qui constituent la lumière et la chaleur, les molécules d'éther se déplacent perpendiculairement au sens de la propagation précisément comme les molécules de l'eau dans la propagation des ondes circulaires. On peut encore se faire une idée des mouvements de l'éther pendant la propagation de la lumière en imaginant qu'une sphère plongée dans un fluide tourne d'une petite quantité sur son centre alternativement à droite et à gauche; les oscillations se communiquant au fluide, celui-ci se divise en couches concentriques qui glissent les unes sur les autres tout d'une pièce, de sorte que les molécules qui composent une même couche conservent leurs distances respectives. Dans un pareil mouvement il n'y a ni compression ni dilatation comme dans le cas de la propagation du son. A la rigueur, il faut bien que les molécules d'éther s'approchent ou s'éloignent les unes des autres pour se transmettre le mouvement, mais les changements de densité sont infiniments petits et du même ordre par exemple que ceux de l'eau pendant la propagation des ondes à sa surface. **Propagation de la lumière.**

1790. La couche d'éther ébranlée par une vibration complète du point lumineux forme ce qu'on appelle une *onde lumineuse*. L'épaisseur de l'onde constitue la *longueur d'ondulation*. La *surface de l'onde* est la surface sur tous les points de laquelle l'ébranlement arrive au même instant; on **Onde lumineuse. Longueur d'ondulation. Surface de l'onde.**

peut aussi dire que c'est la couche infiniment mince ébranlée par un des mouvements élémentaires dont la vibration se compose. Comme l'onde elle-même a très peu d'épaisseur, on confond souvent l'onde avec la surface de l'onde.

Milieu isophane.

1791. On entend par milieu *isotrope* ou *isophane*, celui où la distribution de l'éther est la même dans toutes directions autour d'un point quelconque; dans un pareil milieu la lumière se propage de la même manière dans toutes les directions, de sorte que les ondes y sont sphériques; c'est ce qui a lieu dans le vide, dans l'air, l'eau, le verre et en général dans les milieux qui ne jouissent pas de la double réfraction; c'est seulement dans ces milieux que nous avons étudié et que nous étudions maintenant les phénomènes de la lumière.

Propagation de la lumière composée.

1792. D'après le principe de la superposition des petits mouvements, on doit admettre que les mouvements propres aux différentes lumières peuvent coexister dans la même couche d'éther; de sorte que dans la lumière composée, dans la lumière blanche par exemple, les ondes des diverses couleurs sont superposées et se propagent ainsi sans se séparer; du moins dans le vide.

Propagation en ligne droite. Fig. 483.

1793. Soient OBO, O'B'O' deux positions successives d'une onde engendrée par le point lumineux A; quoique tous les points de OBO puissent être considérés comme des centres d'ondulation, nous savons que le mouvement en B' dérive non pas de toute l'onde, mais seulement d'une très petite portion B située sur la droite qui passe par le point que l'on considère et par le point lumineux (1762), de sorte que chaque élément de l'onde ne transmet de mouvement bien sensible que dans une direction normale; c'est ainsi que dans le système des ondulations on doit concevoir la propagation de la lumière en ligne droite.

Définition du rayon lumineux.

1794. On appelle en général *rayon lumineux*, la ligne suivant laquelle la lumière se propage : c'est la suite des positions qu'il faudrait donner à un petit obstacle depuis le point lumineux jusqu'à l'œil pour arrêter constamment la lumière. Quand les ondes sont sphériques, le rayon lumineux est une droite qui se confond avec le rayon géométrique comme nous venons de le voir. Quand les ondes ne sont pas sphériques, comme cela a lieu, par exemple, dans

l'atmosphère (1478), le rayon lumineux est en général une ligne courbe dont chaque élément est perpendiculaire à la surface de l'onde.

1795. On appelle *rayon visuel* la droite sur laquelle le point lumineux nous paraît placé; c'est la direction suivant laquelle la vision s'opère, soit à l'œil nu, soit avec une lunette. Le rayon visuel qui est toujours une droite se confond avec le rayon lumineux quand les ondes sont sphériques; en général, c'est une tangente au rayon lumineux; il est par conséquent toujours perpendiculaire à la surface des ondes. Rayon visuel.

1796. Le soleil, quand il pénètre par une ouverture AB, donne en général un cylindre de lumière ABCD dont il est aisé de concevoir la formation, puisque l'onde qui se présente à l'ouverture est à peu près plane, et que chacun de ses éléments envoie de la lumière *efficace* perpendiculairement à son plan. Son rayonnement vers les points notablement écartés du cylindre est détruit par des interférences dès que l'ouverture est un peu grande (1770); quant aux points voisins, la lumière qu'ils reçoivent (1765) devient insensible en comparaison du vif éclat de la lumière directe, de sorte que le cylindre doit paraître nettement terminé. Rayon isolé. Fig. 484.

1797. Quand des ondes circulaires à la surface de l'eau sont arrêtées par un obstacle offrant une petite ouverture, le mouvement ne se propage pas seulement en ligne droite; il diverge notablement à partir de l'ouverture, qui devient alors comme un nouveau centre d'ondes. Ce phénomène et la propagation bien connue du son derrière les obstacles, avaient été présentés comme des objections fondamentales contre la théorie des ondes lumineuses; mais il est aisé de voir que si dans le cas des ondes sonores et des ondes à la surface de l'eau, la propagation latérale est beaucoup plus marquée, c'est que les longueurs d'ondulation sont beaucoup plus grandes. Supposons la même ouverture et la même obliquité, la différence BP — AP qui contiendrait par exemple 100,000 demi-ondulations dans le cas de la lumière, en contiendrait tout au plus 2 ou 3 dans le cas de l'eau ou du son; d'où il suit qu'en décomposant l'onde en éléments d'interférence, on aura une partie efficace beaucoup plus considérable (1770). Les différences du reste Objections. Fig. 484.

s'atténuent à mesure qu'on met plus d'analogie dans les circonstances; ainsi à travers une ouverture ayant des dimensions en rapport avec l'extrême petitesse des ondulations lumineuses, le soleil, au lieu d'un rayon cylindrique bien défini, donne une lumière diffuse excessivement dilatée.

On a encore objecté que la lumière étant une ondulation comme le son, devrait pouvoir comme lui se propager en ligne courbe dans des tuyaux. Mais c'est qu'en effet elle s'y propage quand les circonstances sont analogues, quand, par exemple, le tuyau refléchit aussi bien la lumière que les tuyaux ordinaires refléchissent le son; sans doute on n'obtient pas alors d'image nette, mais on n'en a pas non plus dans le cas du son. On peut très bien observer la propagation de la lumière en ligne courbe dans la veine liquide qui s'échappe d'un vase et qui tombe sur un point sombre; car ce point se trouve éclairé, si la veine l'est dans une partie quelconque de son trajet.

Constitution d'un rayon lumineux. 1798. Il est à remarquer que les vibrations des molécules d'éther se font perpendiculairement au rayon (1789) comme dans le cas des ondes à la surface de l'eau. Ainsi les molécules qui dans l'état de repos sont sur une ligne droite AB, forment pendant leur mouvement une ligne sinueuse NN'N qui ressemble à une corde divisée en parties vibrantes (695). Les *écarts am*, *a'm'*, répondent aux différentes *phases de la vibration*, c'est-à-dire aux différentes positions du corps qui vibre; chacun de ces écarts forme une *phase de l'ondulation*; l'écart maximum est la mesure de *l'amplitude des vibrations*. Les *nœuds*, qui sont les points où l'écart est nul, divisent naturellement le rayon en demi-ondulations; il y en a de deux espèces suivant le sens dans lequel l'écart change; deux nœuds consécutifs sont d'espèce différente, deux nœuds séparés par un autre sont de même espèce; ces derniers comprennent toutes les phases d'une ondulation. Observons que les différents écarts ne sont pas toujours dans le même plan, d'où il suit que la ligne qui passe par la position des molécules est en général à double courbure.

Fig. 485.

Telle est l'idée qu'il faut se faire d'un rayon à un instant donné; mais l'instant d'après la forme change; car, pour la propagation de la lumière, le mouvement d'une molécule

m passe à la suivante *m'*; de sorte qu'une même molécule offre successivement tous les écarts que des molécules différentes offrent au même instant, et sa vibration complète dure précisément le temps que met la lumière à parcourir la longueur d'une ondulation. On voit d'après cela que les nœuds se déplacent, et qu'ils avancent avec toute la vitesse de la lumière en conservant leurs distances respectives. On a une représentation assez exacte de ce mouvement avec une corde pendante le long de laquelle se propage une inflexion qu'on a produite à une extrémité.

Nous avons supposé pour plus de simplicité que les molécules d'éther repassaient toujours par leur position d'équilibre à chaque oscillation ; mais réellement elles sont susceptibles de tous les mouvements que nous observons dans un pendule. Ainsi elles peuvent décrire des cercles, des ellipses autour de leur position d'équilibre, ou bien y revenir par des spirales comme dans les différents cas des oscillations coniques.

1799. L'intensité de la lumière sur un point du rayon à un instant donné, a pour mesure le carré de la vitesse de vibration (812, 1367); cette vitesse est proportionnelle à l'écart que tend à prendre la molécule que l'on considère. Quant à l'intensité du rayon lui-même, elle a pour mesure le carré de l'amplitude ou de l'écart maximum. Nous supposons ici que la mesure se prend toujours dans un même milieu, par exemple dans l'air; autrement il faudrait tenir compte de la densité de l'éther qui vibre. **Intensité.**

D'après la mesure de l'intensité, il semblerait que deux bougies devraient éclairer quatre fois autant qu'une seule, puisque, suivant le principe de la superposition des petits mouvements, les vitesses de vibration s'ajoutent. Mais comme les sources lumineuses sont indépendantes (1728), les vibrations se trouvent tantôt en accord, tantôt en désaccord, ce qui donne les intensités 4 et zéro, dont la moyenne est 2.

1800. Pour des problèmes aussi compliqués que ceux de la propagation, de la réflexion, et de la réfraction des mouvements vibratoires, la mécanique rationnelle peut seule donner des démonstrations complètes. Ici nous devons nous borner à concevoir à peu près comment les phéno- **Construction de l'onde résultante.**

mènes se passent ; dans ce but, nous nous aiderons de diverses considérations élémentaires, notamment d'une construction graphique qui est l'application et même l'extension du théorème d'Huygens (1761). Pour voir, par exemple, comment une onde OBO en engendre une autre O'B'O', nous tracerons l'onde élémentaire émanée de chaque point de l'onde génératrice, et nous admettrons que les mouvements de ces ondes se détruisent par des interférences, excepté dans les éléments qui se rencontrent sous des angles infiniment petits. Nous aurons ainsi pour surface de l'onde résultante, la surface tangente à toutes les ondes élémentaires ou leur *surface enveloppe* : Ce sera évidemment une sphère si l'onde génératrice est sphérique, un plan si elle est plane. L'extension du théorème consiste en ce qu'on peut faire dériver l'onde résultante non seulement d'une autre onde, mais même d'une couche quelconque d'éther par laquelle a passé le mouvement dont cette onde résultante est animée. Dans ce cas, les rayons des ondes composantes sont en général inégaux, car il faut toujours que la lumière arrive au même instant sur toute la surface de l'onde résultante.

Fig. 483.

Fig. 484.

Vitesse de la lumière dans les milieux pondérables.

1801. Dans le système des ondes, on trouve que la vitesse de la lumière est moindre dans les milieux plus réfringents (1735), ce qu'on explique en admettant que dans ces milieux l'éther présente une densité plus grande sans un accroissement proportionnel d'élasticité. On appelle *équivalent optique* d'un milieu l'épaisseur du vide qui serait traversée par la lumière dans le même temps que l'unité d'épaisseur de ce milieu. Nous avons déjà dit que les indices de réfraction donnaient le rapport des vitesses dans le vide et dans les différents milieux (1502); les vitesses étant les espaces parcourus dans le même temps, il s'ensuit que les indices de réfraction sont précisément les équivalents optiques; ainsi $1^m,336$, $1^m,5$ sont les épaisseurs de vide qui seraient traversées dans le même temps qu'un mètre d'eau et de verre.

Équivalents optiques.

Inégale vitesse des couleurs.

1802. L'inégale vitesse des couleurs dans les milieux pondérables (1681) s'explique parfaitement dans le système des ondulations ; en effet, M. Cauchy a démontré que d'après les lois de la mécanique, les vibrations dans les milieux pon-

dérables devaient éprouver une diminution de vitesse d'autant plus grande qu'elles étaient plus rapides, c'est-à-dire plus nombreuses dans le même temps; de sorte que la lumière violette, qui a des vibrations plus rapides que la lumière rouge (1788) doit nécessairement se propager moins vite qu'elle.

1803. Le système de l'émission conduit à des résultats tout-à-fait contraires, c'est-à-dire qu'une conséquence forcée de ce système est que la lumière doit se propager plus vite dans les milieux pondérables que dans le vide, et que la vitesse doit être d'autant plus grande que la lumière est plus réfrangible. Cette opposition a donné à M. Arago l'idée d'une expérience directe et indépendante de toute théorie, qui déciderait immédiatement entre les deux systèmes; tout se réduirait à voir, par exemple, si la lumière passe plus vite à travers l'air qu'à travers l'eau. Imaginons que deux points lumineux voisins I, I', situés sur la même verticale, brillent pendant un instant infiniment court devant un miroir AB tournant sur un axe vertical; supposons que le rayon IM du point supérieur n'ait que l'air à traverser, tandis que le rayon I'M' du point inférieur traverse un tube plein d'eau. Il est clair que les rayons réfléchis MR, M'R', ne prendront pas la même direction, puisque les rayons incidents n'arrivant pas ensemble rencontrent le miroir l'un dans la position AB l'autre dans la position A'B'. M. Arago a calculé qu'avec un tube de 5 mètres, le miroir faisant trois mille tours par seconde, l'angle des deux rayons serait de plus d'une demi-minute, quantité bien appréciable dans une lunette. D'après la position des images et le sens dans lequel le miroir tourne, il serait facile de savoir lequel des deux rayons serait arrivé le premier. Il faudrait que l'apparition du point lumineux durât moins qu'un tour du miroir; des écrans mobiles ou une étincelle électrique rempliraient cette condition. D'ailleurs en se servant, par exemple, de trois miroirs rotatifs qui se renverraient les rayons, on pourrait obtenir le même écartement avec mille tours seulement par seconde. Le sulfure de carbone produirait le même effet que l'eau avec une longueur beaucoup moindre (1501). Il serait même possible que dans ce liquide qui a un très grand pouvoir dispersif (1687), la vitesse des rayons rouges et

Opposition des deux théories.

Fig. 486.

violets fût assez inégale pour que ces rayons se trouvassent sensiblement séparés dans la lumière réfléchie. Dans ce cas, pour savoir si la lumière est un corps ou une onde, on n'aurait qu'à examiner si l'extrémité rouge de l'image est à droite ou à gauche, et cela, bien entendu, suivant le sens de la rotation du miroir.

Absorption; opacité transparente. L'absorption (1392) n'a pas encore été véritablement expliquée dans le système des ondes pas plus que dans le système de l'émission; seulement on peut dire que les corps pondérables par leur constitution même sont incapables de transmettre sans perte le mouvement qui constitue la lumière. Un corps est opaque lorsque la distance ou le mouvement devient insensible et comparable à la longueur d'une ondulation, qui est, comme on le sait, d'à peu près un demi-millième de millimètre; dans les autres cas le milieu doit être considéré comme transparent. M. Cauchy

Coefficient d'extinction. appelle *coefficient d'extinction*, un nombre qui indique la rapidité plus ou moins grande avec laquelle le mouvement s'éteint en pénétrant dans un corps opaque; pour l'argent il a trouvé 2,96, pour l'acier 3,04, le métal des miroirs 3,39, le mercure 4,41.

Action des milieux colorés. L'analyse démontre que, dans un même milieu, l'affaiblissement du mouvement peut être fort inégal suivant la longueur d'ondulation, ce qui explique la décomposition de la lumière par l'absorption (1652).

Réflexion. Sa cause. 1805. Tant que la densité de l'éther reste la même, le mouvement qui produit la lumière passe tout entier d'une couche à l'autre, sauf la perte par l'absorption; et la couche, qu'on peut appeler incidente, rentre en repos comme dans le cas du choc des billes égales (281). Mais quand la densité est différente, ainsi que cela arrive au moment où la lumière se présente pour passer d'un milieu dans un autre, alors la couche incidente continue à se mouvoir, soit dans le même sens, soit en rétrogradant, suivant les circonstances; dans les deux cas, son mouvement se propage dans le milieu auquel elle appartient et constitue la lumière réfléchie.

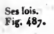
Changement de phase. 1806. Lorsque les molécules d'éther qui composent l'onde incidente rétrogradent par le fait de la réflexion, elles passent tout-à-coup d'une phase où la vibration se fait dans un

sens, à une phase où la vibration se fait en sens inverse (1798); c'est ainsi qu'il peut y avoir suppression d'une demi-ondulation (1743); ce cas doit se présenter quand l'éther est plus dense dans le milieu réfléchissant. Et en effet, Fresnel a reconnu qu'il y avait interférence entre deux rayons qui ne diffèrent que parce que l'un d'eux s'était réfléchi sur le verre. D'après les expériences de M. Babinet, il y a aussi perte d'une demi-ondulation dans la réflexion du verre sur l'air quand cette réflexion est totale. Il s'ensuit que ce changement de phase dépend non seulement de la densité de l'éther, mais aussi de l'angle d'incidence. D'ailleurs, comme on le conçoit, le changement de phase ne consiste pas toujours précisément dans la suppression d'une demi-ondulation; il est susceptible d'une infinité de degrés.

Réflexion spéculaire. **Fig. 487.**

1807. Soit P le point lumineux, MN l'onde incidente; les molécules d'éther près du plan AB qui sépare les deux milieux se trouvent successivement ébranlées chacune au même instant que s'il n'y avait qu'un seul milieu dans lequel se propageât une onde émanée du point P′ symétrique de P. La forme d'une onde ne dépendant ni de la direction de l'ébranlement ni de son intensité, il s'ensuit que, quant à la forme, l'onde réfléchie ADB est identique avec l'onde AB qui serait émanée de P′ à l'instant où l'onde incidente émanait de P.

On arrive au même résultat en observant que les points du plan AB, à mesure que l'ébranlement leur arrive, deviennent des centres d'ondes élémentaires qui se propagent du côté de P. Si on décrit ces ondes en leur donnant à chacune pour rayon la longueur qu'aurait parcourue la lumière pour former l'onde directe, on a évidemment les ondes composantes (1800); or, il est clair que leur surface enveloppe, qui est l'onde résultante ADB, reproduit symétriquement l'onde arrêtée AD′B. Quand les ondes à la surface de l'eau sont arrêtées par un plan, on reconnaît aussi que l'onde réfléchie est le complément de l'onde incidente.



Ses lois. **Fig. 487.**

1808. Comme le rayon visuel est normal à la surface de l'onde (1795), la direction du rayon réfléchi pour l'œil O est P′RO. Le mouvement propagé dans cette direction provient du point R où il est arrivé suivant la droite PR, qui est par conséquent le rayon incident; or, il est facile de

voir qu'on retrouve ainsi les lois de la réflexion données par l'expérience (1428).

Cas d'un rayon isolé. Fig. 488.

1809. Dans le cas d'un rayon isolé, soit SABS le rayon, AC l'onde incidente que nous supposons plane; si on imagine une onde symétrique AC', en admettant d'abord qu'il n'y ait qu'un même milieu, il est clair que les molécules dans le plan AB seraient ébranlées au même instant par l'une ou par l'autre des deux ondes, d'où il suit que l'onde résultante BD aura la même forme et la même position dans les deux cas (1792). On voit facilement d'ailleurs que le rayon S'ABS' ainsi déterminé, se trouve soumis aux deux lois de la réflexion.

Réflexion irrégulière.

1810. La réflexion *spéculaire* ou régulière que nous venons de considérer ne s'observe bien que sur les corps polis; sur les autres, les centres d'ondulation à la surface ne sont plus disposés de manière à produire une forte lumière dans une certaine direction et des interférences complètes dans toutes les autres, de sorte qu'on a un rayonnement plus ou moins égal en tous sens. Du reste on conçoit que les inégalités de la surface doivent avoir une influence d'autant moindre que les ondulations sont plus longues; voilà pourquoi la lumière rouge se réfléchit de préférence dans certains cas (1647). Des aspérités qui pour la lumière empêchent toute réflexion régulière, sont évidemment sans influence dans le cas du son.

Outre la réflexion irrégulière produite par les inégalités, il y a encore une réflexion irrégulière qui a lieu pour tous les corps, même les mieux polis, et qui se fait à une certaine profondeur au-dessous de la surface (1660). On conçoit la possibilité de cette réflexion en observant que près des limites des corps la densité et la disposition de l'éther doivent varier par degrés dans une certaine épaisseur; la réflexion est même possible dans l'intérieur d'un même milieu pondérable, puisque la densité de l'éther change dans le voisinage des atomes. Ce sont ces diverses réflexions irrégulières qui, en général, rendent visibles les corps non lumineux par eux-mêmes en produisant le phénomène de l'*éclairement* (1384).

Réfraction, sa cause. Fig. 489.

1811. La réfraction de la lumière est une conséquence nécessaire de l'inégalité de vitesse dans les différents milieux.

Soit P le point lumineux, M C N l'onde incidente; les molécules du second milieu près du plan de séparation A C B se trouvant successivement ébranlées, engendrent une onde A D B qui est évidemment aplatie si la vitesse est moindre dans le second milieu. Or, le rayon visuel étant toujours normal à la surface de l'onde (1795), il est évident qu'un rayon dans le second milieu devra former une ligne brisée avec le rayon incident d'où il dérive.

1812. Pour construire l'onde réfractée correspondante à l'onde incidente, il faut de chaque point du plan de séparation décrire une onde élémentaire avec un rayon tel que la lumière arrive au même instant sur toute la surface de l'onde résultante (1800). Par exemple, pour le point E, si la lumière passe de l'air dans le verre, le rayon E G de l'onde composante sera les $\frac{2}{3}$ de F B. Construction de l'onde réfractée.

1813. En appliquant cette construction au cas d'une onde plane A C, on voit facilement que l'onde résultante B D est plane aussi; de plus si on observe que l'angle d'incidence $i = CBN = CAB$, et que l'angle de réfraction $r = N'BR = ABD$, on a $\sin. i = \frac{BC}{AB}$, $\sin. r = \frac{AD}{AB}$, d'où $\frac{\sin. i}{\sin. r} = \frac{BC}{AD}$ $= \frac{\text{vitesse dans l'air}}{\text{vitesse dans le verre}}$. Comme les vitesses dans chaque milieu sont constantes, il s'ensuit qu'il y a un rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction (1489). Cette démonstration s'applique aux parties élémentaires d'une onde sphérique qu'on peut toujours prendre assez petites pour qu'il soit permis de les considérer comme planes. Il est évident d'ailleurs, par la raison de symétrie, que le rayon incident et le rayon réfracté doivent être dans un même plan normal à la surface réfringente. Lois de la réfraction. Fig. 490.

1814. Les différentes couleurs ayant des vitesses différentes dans un même milieu pondérable (1802), il est évident qu'elles doivent se réfracter inégalement dans un pareil milieu, ce qui produit le phénomène de la dispersion (1623). Dispersion angulaire.

1815. L'analyse démontre que le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction n'est plus constant quand la lumière pénètre dans un milieu opaque (1804); cependant il varie très peu. La loi de Descartes est encore en défaut dans le cas de la réflexion dite totale; alors une portion de Loi de Descartes en défaut.

la lumière échappe réellement à la réflexion et se réfracte parallèlement à la surface réfringente, de sorte que l'angle de réfraction reste droit malgré la variation de l'angle d'incidence.

Le mouvement de la terre n'influe pas sur la réfraction.

1816. Si la lumière se composait de particules lancées avec une vitesse de 70,000 lieues par seconde, la vitesse moyenne de la terre dans son orbite étant de 7 lieues, il s'ensuivrait que quand nous marchons directement vers une étoile, la vitesse de la lumière se trouverait augmentée de $\frac{1}{10000}$, ce qui produirait une différence d'environ 30″ dans la déviation donnée par un prisme; or, M. Arago a constaté que la déviation restait toujours la même, d'où il suit que, dans ce cas, le mouvement de la terre est réellement sans influence sur la vitesse de la lumière. Dans le système de l'émission, l'on explique ce fait en supposant que les corps lumineux lancent des particules douées de vitesses très différentes, et que la sensation de la lumière est due seulement aux particules qui par rapport à nous ont une vitesse de 70,000 lieues.

Dans le système des ondes, l'explication est toute naturelle en admettant que la terre emporte avec elle l'éther qui entre dans sa constitution, car alors les choses doivent se passer pour la lumière comme pour un son qui serait produit aux limites de l'atmosphère, la propagation dans l'air ne se ferait évidemment ni plus ni moins vite que si la terre était en repos. Il est vrai que dans cette hypothèse il n'est pas facile d'expliquer l'aberration (1399), mais cependant M. Cauchy ne pense pas que cela soit impossible.

De la théorie mathématique des ondulations.

1817. Les derniers travaux de M. Cauchy ont donné une immense probabilité à la théorie des ondulations. En considérant le cas d'un système de molécules tenues en équilibre à distance par des attractions et des répulsions mutuelles, ce qui est bien le cas des atomes pondérables et de l'éther, ce géomètre a reconnu qu'en général deux espèces de vibrations pouvaient se propager les unes avec les autres, sans changement de densité. Ces dernières, qui ont encore pour caractère de s'effectuer perpendiculairement à la direction suivant laquelle elles se propagent, reproduisent identiquement tous les mouvements vibratoires imaginés par les physiciens pour expliquer les phénomènes de la lumière,

ce qui démontre déjà que ces mouvements sont parfaitement compatibles avec les lois de la mécanique. En outre, l'analyse mathématique, nécessairement plus sûre dans ce cas que le simple raisonnement, prouve que ces mouvements vibratoires se propagent, s'affaiblissent, se réfléchissent, se réfractent, se dispersent, se polarisent précisément suivant les lois que l'expérience fait reconnaître pour la lumière; de sorte qu'il devient réellement impossible de ne pas croire que la lumière consiste en effet dans ces mouvements.

Quant aux vibrations avec changement de densité, et qui se font dans le sens même de la propagation, elles produisent sans aucun doute les phénomènes du son quand elles ont lieu spécialement dans les molécules pondérables; M. Cauchy pense que dans l'éther elles produisent la chaleur; mais dans cette manière de voir on ne concevrait pas comment la chaleur peut se polariser.

CHAPITRE VIII.

POLARISATION DE LA LUMIÈRE PAR RÉFLEXION ET PAR RÉFRACTION.

§ I. *Polarisation rectiligne.*

1818. Par des réflexions ou des réfractions obliques, par sa transmission à travers certains corps, la lumière se trouve modifiée de telle sorte que *les rayons présentent des propriétés différentes sur leurs différentes faces;* on dit alors qu'elle est *polarisée.* La polarisation de la lumière a été découverte en 1810 par Malus, l'un des élèves les plus distingués sortis de l'École Polytechnique. Les conséquences de cette découverte ont été immenses surtout pour la théorie de l'optique. **Lumière polarisée.**

1819. Soit un rayon polarisé A B que nous supposons vertical; si avec une glace *non étamée* on le réfléchit horizontalement dans différents azimuts, B P, B Z, etc., on trouve que la lumière réfléchie est plus ou moins intense, **Caractères tirés de la réflexion.** Fig. 491.

ce qui montre bien que les différents côtés par lesquels on touche le rayon ne jouissent pas des mêmes propriétés. Il y a toujours deux maxima et deux minima de lumière à angles droits, de sorte que, si le rayon réfléchi vers le sud est très intense, le rayon réfléchi vers le nord l'est aussi; tandis que les rayons réfléchis vers l'est ou vers l'ouest sont très faibles; l'intensité croît et décroît régulièrement d'une position à l'autre. Nous avons supposé le rayon vertical avec ses faces en quelque sorte orientées, mais c'était seulement pour indiquer plus aisément ses propriétés, car la polarisation d'un rayon ne dépend nullement de sa position dans l'espace. De même pour observer les maxima et les minima il n'est pas nécessaire que la réflexion se fasse horizontalement : le rayon réfléchi peut faire un angle quelconque avec le rayon polarisé, pourvu que cet angle reste le même dans tous les azimuts. Pour obtenir des maxima et des minima aussi marqués que possible, il faut que la lame réfléchissante fasse un angle d'environ 34° avec le rayon polarisé; si celui-ci n'est pas très intense, la lumière peut alors être nulle dans les minima.

Plan de polarisation. Fig. 491.

1820. On appelle *plan de polarisation* le plan qui passe par le rayon polarisé et par les faces de plus grande réflexion; ZZ' est le plan de polarisation, si les rayons réfléchis dans ce plan sont plus intenses que dans les autres plans tels que PP'. Quand on dit qu'un rayon est *polarisé dans un plan*, dans le plan ZZ' par exemple, cela signifie que ce plan est le plan de polarisation. On entend par *azimut du plan de polarisation*, l'angle aigu ZBP que le plan de polarisation ZZ' forme avec un plan fixe PP' passant comme lui par le rayon polarisé. Quand il s'agit de la réflexion et de la réfraction, c'est ordinairement le plan d'incidence qu'on prend pour plan fixe.

Azimut du plan de polarisation.

Appareil de polarisation. Fig. 492.

1821. Pour étudier les phénomènes de la polarisation, on se sert particulièrement d'un tube AA', mobile sur un pied comme une lunette et portant à ses extrémités des miroirs M, M', ou d'autres pièces qu'on peut tourner et incliner dans toutes les directions; il y a pour cela des tambours gradués A, A', et des cercles divisés C, C'. Les miroirs sont des glaces noircies par derrière pour qu'il n'y ait de réflexion qu'à la première surface. On conçoit que quand le

premier miroir M est fixé, la lumière qui se trouve réfléchie suivant l'axe du tube, forme nécessairement avec le miroir le même angle que le miroir forme avec l'axe; de quelque manière qu'on tourne ensuite l'instrument vers les nuées, vers le soleil, vers une bougie, on est toujours sûr de n'opérer que sur de la lumière réfléchie sous un angle déterminé et connu. On peut rendre les maxima et les minima visibles dans un cours en employant la lumière du soleil; il est commode alors d'adapter un verre dépoli qui tourne avec le miroir d'épreuve M', en restant vis-à-vis lui pour recevoir l'image.

1822. On reconnaît avec cet appareil : 1° que *le plan de polarisation du rayon réfléchi est le plan de réflexion*, c'est-à-dire que c'est le plan formé par le rayon incident SM et le rayon réfléchi MM'. En effet, on a des maxima de la lumière quand les plans des deux réflexions coïncident, et des minima quand ces plans sont perpendiculaires entre eux (1820). Il est clair que le plan de polarisation par réflexion est normal à la surface réfléchissante. 2° La polarisation est aussi complète que possible, quand le rayon incident SM est réfléchi sous un angle qui varie de 33 à 35° suivant la qualité des verres. En changeant la surface réfléchissante on reconnaît de même que *chaque substance a un angle de polarisation*; on appelle ainsi l'angle sous lequel la lumière réfléchie contient le moins possible de lumière non polarisée; pour l'eau, cet angle est de 37°, par l'obsidienne de 33° $\frac{1}{2}$, le soufre 30°, le diamant 23°. 3° *Les substances peu réfringentes* polarisent presque toute la lumière qu'elles réfléchissent sous l'angle de polarisation; c'est le cas de l'eau, du verre et surtout de l'obsidienne; l'intensité est alors à peu près nulle dans les minima, du moins avec la lumière des nuées, quand d'ailleurs le rayon polarisé tombe aussi sur le miroir d'épreuve sous l'angle de polarisation (1818). 4° *La polarisation est toujours incomplète sur les substances très réfringentes*, comme le soufre, le verre d'antimoine, le diamant, et en général pour les milieux dont l'indice de réfraction dépasse 1, 7; l'intensité alors n'est jamais nulle dans les minima, quelque faible que soit la lumière incidente. 5° *La polarisation est nulle sur les métaux et dans le cas de la réflexion totale*; ainsi lorsqu'on emploie des miroirs

Polarisation par réflexion.

Plan de polarisation.

Angle de polarisation.

Polarisation complète.

— incomplète.

— nulle.

métalliques, des glaces étamées ou des prismes disposés pour la réflexion totale, les signes de polarisation que peut donner l'appareil disparaissent. En résumé, on voit que les substances qui polarisent le plus complétement la lumière sont en général celles qui en réfléchissent le moins.

Expérience de Brewster. 1823. On fait avec l'appareil précédent une expérience qui montre bien que l'angle de polarisation n'est pas le même pour les différentes substances. Si, pendant que les miroirs sont dans la position convenable pour que la réflexion soit nulle, on souffle doucement sur le miroir d'épreuve, la lumière paraît à l'instant. La cause en est claire : l'haleine dépose sur le verre une mince couche d'eau qui doit réfléchir une partie du rayon polarisé, puisque ce rayon lui arrive sous l'incidence de 34° et non de 37. Maintenant si l'on donne au miroir d'épreuve l'inclinaison de 37°, la surface étant sèche, on aura de la lumière réfléchie, mais cette lumière disparaîtra en soufflant sur le miroir ; avec deux lames de verre inclinées, l'une de 34, l'autre de 37°, et recevant chacune la moitié du rayon polarisé, on éteint une image et on ranime l'autre du même souffle.

Quantité de lumière polarisée. 1824. Un rayon réfléchi se compose en général de lumière polarisée et de lumière non polarisée, qu'on parvient à séparer comme nous le verrons plus loin. Sous l'angle de polarisation, le verre réfléchit 7 ou 8 centièmes de la lumière incidente, et toute cette lumière est polarisée. A mesure que l'obliquité augmente, la quantité de lumière polarisée augmente aussi ; elle s'élève à près de 16 centièmes quand l'angle avec la surface est de 12° ; c'est là qu'est son maximum, mais alors elle est mêlée d'une très forte proportion de lumière non polarisée, et c'est ce qui fait que les changements d'intensité sont peu marqués dans le rayon réfléchi par le miroir d'épreuve. On voit d'après cela que l'angle de polarisation n'est pas l'angle sous lequel il y a le plus de lumière polarisée ; et il ne faudrait pas confondre les substances qui polarisent le plus complétement la lumière, avec celles qui en polarisent la plus grande quantité.

Loi de Brewster. 1825. Il résulte des observations de M. Brewster que *pour l'angle de polarisation, le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté*. Soit ICN $= i$ l'angle d'incidence, DCR $= r$ l'angle de réfraction ; puisque PCR est un angle droit,

Fig. 493.

on aura évidemment $i + r = 90^\circ$, ce qui fournit un nouvel énoncé de la loi. Enfin on peut en avoir un troisième, car le deuxième énoncé donne sin. $r =$ cos. i; avec cette valeur et la loi de Descartes (1489) on a tg $i = n$, c'est-à-dire que dans le cas de la polarisation maximum, la tangente de l'angle d'incidence est égale à l'indice de réfraction. On voit que cet indice est la cotangente de l'angle de polarisation compté avec la surface comme on le fait ordinairement.

1826. La loi de Brewster donne immédiatement l'angle de polarisation des substances dont on connaît l'indice de réfraction; aussi pour l'eau on a $n = 1,336 =$ cot. $36^\circ\ 49'$, ce qui s'accorde avec les mesures directes. Pour le verre l'application de la loi n'est pas aussi sûre, parce que sa surface s'altère souvent et prend une puissance réfractive différente de celle de la masse. La loi de Brewster s'applique au cas de la réflexion intérieure, et en général au cas de deux milieux isophanes superposés. Une conséquence remarquable, c'est qu'avec une lame dont les faces parallèles sont en contact avec un même milieu, le rayon réfracté rencontre aussi la seconde sous l'angle de polarisation, s'il en a été de même du rayon incident par rapport à la première : car l'angle entre le rayon émergent et le rayon réfléchi intérieur est toujours égal à l'angle entre le rayon réfléchi extérieurement et le rayon réfracté; si donc l'un est droit, l'autre l'est aussi. Applications.

1827. Il est évident par la formule tg $i = n$ que l'angle de polarisation n'est pas le même pour les différentes couleurs (1680); cela explique pourquoi la lumière blanche ne peut jamais être complétement polarisée par réflexion (1822). Si l'inclinaison est convenable pour un rayon, elle ne l'est pas pour un autre. La différence des angles de polarisation pour les rayons rouges et violets est d'un quart de degré pour l'eau, d'un tiers de degré pour le verre; elle augmente nécessairement avec le pouvoir dispersif (1687). Angle de polarisation pour les différentes couleurs.

1828. De même que la réflexion oblique la réfraction oblique polarise la lumière. Pour avoir ce phénomène dans toute sa simplicité, il faut dans l'appareil de polarisation remplacer le premier miroir par un prisme disposé de telle sorte que la lumière en sorte perpendiculairement pour Polarisation par réfraction.

des piles polarisantes qui ont l'avantage d'absorber très peu de lumière.

Les piles de glaces donnent aussi par réflexion un rayon complétement polarisé très intense; 10 ou 12 verres à vitres bien dressés suffisent quand l'incidence a lieu sous l'angle de polarisation; les réflexions à l'intérieur de chaque lame contribuent, comme nous avons, à l'effet (1826). On pourrait avoir de la lumière complétement polarisée sous un angle autre que celui de polarisation, mais il faudrait un nombre de glaces de plus en plus grand à mesure qu'on s'éloignerait de cet angle.

1830. On appelle polariscopes des instruments avec lesquels on reconnaît la lumière polarisée, et ordinairement aussi son plan de polarisation. Les plus usités sont : 1° le second miroir de l'appareil de polarisation (1821); 2° *l'analyseur de Delezenne*. La pièce essentielle est une petite glace noire M qui agit comme le miroir de l'appareil; mais le rayon réfléchi MP éprouve une réflexion totale dans un prisme P, de sorte qu'il arrive à l'œil presque sans perte et dans une direction PO parallèle à sa direction primitive LM. La glace et le prisme sont fixés sur un petit disque de 2 ou 3 centimètres, de manière que les deux surfaces réfléchissantes soient inclinées de 34° par rapport à l'axe. On tourne le disque devant l'œil jusqu'à ce qu'on ait le maximum de lumière; le plan de réflexion dans ce cas est le plan de polarisation que l'on cherche (1822). 3° Une pile de glace ou de lames de mica (1829) constitue un polariscope qu'on peut très bien substituer au second miroir dans l'appareil de polarisation (1837). 4° On forme un excellent polariscope avec la tourmaline, qui est une pierre transparente verte ou brune qu'on trouve en aiguilles plus ou moins volumineuses; on polit deux faces opposées parallèles entre elles et à l'axe de l'aiguille. La lame ainsi obtenue, quelque inclinaison qu'on lui donne dans son plan, laisse toujours passer la même proportion de lumière naturelle; mais si la lumière est polarisée, on observe des maxima et des minima dans deux positions rectangulaires. Une tourmaline est d'autant meilleure qu'elle est plus opaque dans une position et plus transparente dans l'autre. Le plan de polarisation est déterminé par l'axe de la tourmaline et par le rayon visuel; Polariscopes. Fig. 496.

dans le cas d'un minimum. 5° On fait avec le spath d'Islande, comme nous le dirons plus loin, un appareil qui jouit des propriétés de la tourmaline, avec l'avantage de donner une lumière incolore et plus intense. 6° Le polariscope de M. Babinet se compose d'une tourmaline appliquée sur un morceau de verre trempé; la tourmaline étant contre l'œil, on aperçoit des couleurs pour peu qu'il y ait de lumière polarisée dans le rayon incident. 7° Le polariscope de M. Savart fait voir, avec la lumière polarisée,
Fig. 462. des lignes irisées qui ressemblent aux franges d'interférence, et qui ont leur maximum d'éclat dans deux positions rectangulaires. Ces deux positions diffèrent en ce que dans l'une la bande centrale est noire, tandis que dans l'autre elle est éclairée. Ordinairement l'appareil est construit de telle sorte que le plan de polarisation est donné par la bande obscure; d'ailleurs on s'en assure une fois pour toutes avec de la lumière dont on connaît le plan de polarisation. Ce petit instrument est d'une sensibilité extraordinaire, mais il laisse quelquefois un peu de doute sur le plan de polarisation. M. Delezenne l'a modifié d'une manière très commode pour reconnaître ce plan. Nous ne donnerons la construction de ce polariscope et nous ne parlerons de l'appareil à images colorées de M. Arago qu'en étudiant la double réfraction.

Cas de polarisation.

1831. Avec la tourmaline ou l'analyseur, on reconnaît facilement la polarisation de la lumière réfléchie par l'eau, les surfaces mouillées, les vitres, les marbres polis, les parquets cirés, les meubles et tous les objets vernis; les métaux vernis se distinguent même de cette manière, car si leur surface est nue, il n'y a plus ni maxima ni minima, pourvu du moins qu'on les éclaire avec une lumière non polarisée, celle d'une bougie par exemple. Mais alors l'appareil de M. Savart y fait découvrir des traces de polarisation; il en fait aussi découvrir dans la lumière réfléchie ou réfractée par presque tous les corps.

Polarisation de la lumière du ciel.

1832. Il résulte des observations de M. Arago que l'air *serein* polarise très fortement la lumière du soleil tant par réflexion que par réfraction. Les signes de polarisation ne commencent à se montrer qu'à une certaine distance de l'astre; ils augmentent jusqu'à 90° environ, au-delà ils di-

minuent et finissent par devenir nuls ; mais ensuite ils reparaissent dans la région du ciel opposée au soleil. Dans la première région, la lumière est polarisée par réflexion ; car le plan de polarisation contient des rayons incidents ; dans la seconde elle l'est par réfraction ; car le plan de polarisation ne passe plus par le soleil (1828). Ces phénomènes se voient avec une tourmaline, mais surtout avec l'appareil de M. Savart. Quand les franges ont la plus grande vivacité possible, on remarque que la ligne moyenne qui indique le plan de polarisation, se dirige vers le soleil ou se trouve perpendiculaire aux rayons de cet astre, suivant qu'on examine la première ou la deuxième région. La symétrie que nous supposons ici est dérangée quand il y a quelques nuages. Si le ciel est entièrement couvert, les signes de polarisation disparaissent. M. Delezeune s'est assuré qu'un ciel serein, éclairé par la lune, donnait de la lumière polarisée. Il en serait de même sans doute avec toutes les lumières assez fortes pour éclairer une portion notable de l'atmosphère. Ce serait toujours à 90° de distance angulaire qu'il faudrait surtout chercher les signes de polarisation.

Applications de la polarisation.

1833. On doit à M. Arago une série d'observations et de découvertes remarquables faites à l'aide de la polarisation ; nous en indiquerons ici quelques unes : 1° la lumière qui émane des corps incandescents, solides ou liquides, est toujours partiellement polarisée par réfraction (1828), quand les rayons forment, avec la surface, un angle d'un petit nombre de degrés ; il est clair, d'après cela, qu'une partie notable de la lumière vient alors d'une certaine profondeur au-dessous de la surface ; 2° la lumière des gaz enflammés ou la flamme proprement dite, ne présente jamais aucune trace de polarisation, et comme c'est précisément le cas de la lumière du soleil, il s'ensuit que la partie visible de cet astre doit être une substance gazeuse enflammée, et non pas un corps solide ou liquide incandescent ; 3° les comètes ne sont pas lumineuses par elles-mêmes, car leur lumière est polarisée par réflexion ; 4° la lumière des halos (1716) est polarisée par réfraction, ce qui confirme l'explication de Mariotte ; 5° les anneaux colorés (1742), donnés par une lentille posée sur un miroir métallique, disparaissent complétement quand on les regarde avec une

tourmaline sous l'angle de polarisation; dans ce cas, on n'arrête pas les rayons réfléchis par le métal, puisqu'ils ne sont pas polarisés; mais puisque l'élimination des autres suffit pour détruire le phénomène, on a une nouvelle preuve que celui-ci est un résultat d'interférence; 6° les rayons réfléchis par la surface de l'eau empêchent quelquefois de distinguer à une certaine profondeur dans ce liquide; une tourmaline donne le moyen d'arrêter ces rayons réfléchis, ce qui peut permettre, par exemple, de voir un écueil sous la surface.

Réflexion de la lumière polarisée.

1834. Nous ne nous sommes occupé de la réflexion de la lumière polarisée que comme d'un moyen de reconnaître la polarisation; mais cette réflexion mérite bien d'être considérée en elle-même. Un fait, d'abord très remarquable, c'est que sur un miroir étamé ou métallique, et dans le cas de la réflexion totale, l'intensité du rayon réfléchi est la même dans les différents azimuts; cependant la lumière reste en général polarisée, au moins en partie, comme on peut s'en assurer avec un polariscope. En définitive, on n'obtient des maxima et des minima que quand la surface réfléchissante est capable de produire par elle-même la polarisation rectiligne; et encore les minima ne sont tout-à-fait nuls qu'avec les substances qui peuvent polariser complétement. Nous ne considérons que ce cas dans ce qui va suivre.

Loi de Malus.

1835. Quand l'incidence a lieu sous l'angle de polarisation, l'intensité de la lumière réfléchie dans les différents azimuts (1821) suit une loi très simple que Malus avait admise comme une hypothèse, mais que M. Arago a vérifiée. Si on prend pour unité l'intensité du rayon réfléchi, quand le plan de réflexion coïncide avec le plan de polarisation, l'intensité est $\cos^2 a$ quand l'azimut du plan de réflexion est a. Ainsi, par exemple, l'intensité est $\frac{1}{2}$ quand l'angle, entre le plan de réflexion et le plan de polarisation est de 45°.

Influence de l'obliquité.

1836. Considérons maintenant l'influence de l'obliquité sur l'intensité de la lumière réfléchie. Quand on fait réfléchir, sous différents angles, soit de la lumière naturelle soit de la lumière polarisée dans le plan d'incidence, on trouve que l'intensité de la lumière réfléchie va toujours en augmentant avec l'obliquité; mais il n'en est pas de même avec un rayon polarisé perpendiculairement au plan d'inci-

dence ; la lumière réfléchie augmente d'abord, puis ensuite elle diminue jusqu'à devenir nulle sous l'angle de polarisation. Au-delà elle augmente de nouveau et très rapidement, car la réflexion est toujours à peu près totale quand l'obliquité est la plus grande possible.

1837. On doit à Fresnel des formules qui donnent la proportion de lumière réfléchie dans les deux cas que nous venons de considérer. Ces formules n'étaient pas d'abord complétement démontrées, mais elles l'ont été depuis par M. Cauchy. Soit i l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction ; en prenant pour unité l'intensité du rayon incident, on a pour l'intensité du rayon réfléchi $\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$ ou $\frac{\mathrm{tg}^2(i-r)}{\mathrm{tg}^2(i+r)}$ suivant que la lumière est polarisée dans le plan d'incidence ou perpendiculairement à ce plan. Sous l'angle de polarisation la deuxième valeur se réduit à zéro, puisque alors $i+r=90°$ (1825) ; quant à la première, elle devient $\sin.^2(i-r)$ ou simplement $\left(\frac{n^2+1}{n^2-1}\right)$ en observant que dans le cas actuel $\cos r=\sin i$ et que $\mathrm{tg}\, i=n$. Pour appliquer cette formule à l'eau, prenons $n=\frac{4}{3}$, nous trouverons que ce liquide réfléchit les 68 millièmes de la lumière incidente, quand celle-ci est complétement polarisée dans le plan d'incidence. Pour le verre, en prenant $n=\frac{3}{2}$ on a 148 millièmes ou plus du double. Formules de Fresnel.

1837 *bis*. On peut étudier la réfraction de la lumière polarisée au moyen d'une pile de glaces (1829) ; on trouve ainsi que la transmission est surtout difficile quand le plan de réfraction coïncide avec le plan de polarisation. Au contraire quand le rayon incident est polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, il est transmis facilement et même en totalité s'il arrive sous l'angle de polarisation ; nous savons en effet qu'alors il n'y a plus de lumière réfléchie. D'après les propriétés que nous venons de signaler, on conçoit qu'une pile de glaces peut servir de polariscope (1830, 3°). Les glaces s'ajustent dans un tube qu'on tient comme une lunette ; leur surface doit faire un angle de 34° avec l'axe du tube. Il est clair que le plan de polarisation est perpendiculaire au plan de réfraction quand on a le maximum de lumière. Réfraction de la lumière polarisée.

Action remarquable des piles.

1838. Les piles assez nombreuses pour être presque opaques dans une direction perpendiculaire ont la curieuse propriété de devenir plus transparentes quand la lumière les traverse obliquement; c'est ce qu'on peut constater en regardant une bougie à quelques mètres de distance à travers une pile de 40 ou 50 plaques; le maximum de transparence a lieu quand la lumière arrive sous l'angle de polarisation. On se rend compte de ce fait en observant qu'une partie de la lumière qui traverse les premières plaques se polarise par réfraction dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence, d'où il suit qu'elle est dans les conditions convenables pour traverser les autres plaques sans s'affaiblir par la réflexion.

Changement du plan de polarisation : 1° Par la réflexion. Fig. 496.

1839. Soit O B un rayon incident, BQ le rayon réfléchi, ABD le rayon d'incidence, EBC le plan de réflexion, plans qui coïncident, comme on sait; soit PBP′ le plan de polarisation du rayon incident. L'expérience prouve que le plan de polarisation RBR′ du rayon réfléchi est incliné de l'autre côté du plan commun d'incidence et de réflexion, quand l'angle d'incidence OBN est plus petit que l'angle de polarisation (ces deux angles étant ici comptés avec la normale). Au contraire, les deux plans de polarisation restent inclinés du même côté, si l'angle d'incidence surpasse l'angle de polarisation ; s'il surpasse, par exemple, 56° pour le verre. Dans ces deux cas, l'azimut RQE du plan de polarisation du rayon réfléchi est moindre que l'azimut POD du rayon incident, de sorte que la réflexion rapproche toujours le plan de polarisation du plan de réflexion. Lorsque l'incidence a lieu sous l'angle de polarisation, le plan de polarisation se trouve toujours amené dans le plan de réflexion quel qu'ait été son azimut dans le rayon incident. Ces faits peuvent se vérifier avec l'appareil de la fig. 354; en P et en R, on ajoute des tambours gradués et des cercles divisés comme dans l'appareil de polarisation (1821). A l'aide d'un miroir ou d'une pile de glaces en I on se procure un rayon polarisé dans un azimut connu; puis avec le miroir qui est en R ou avec une tourmaline on détermine l'azimut du rayon réfléchi. Pour cette expérience, le miroir central M ne doit être ni étamé ni métallique; il faut qu'il soit de nature à polariser la lumière.

2° Par la réfraction.

1840. En remplaçant le miroir central par une pile de

glaces, et en mettant le tube R dans le prolongement du tube I, on peut étudier le changement que la réfraction apporte dans la direction du plan de polarisation. On trouve ainsi que la réfraction tend à rendre le plan de polarisation perpendiculaire au plan de réfraction.

1841. Il résulte des travaux de Fresnel, confirmés par ceux de M. Cauchy, que la polarisation rectiligne consiste en ce que les vibrations des molécules situées sur un rayon se font dans un même plan (1798); ainsi nous pourrons nous représenter un rayon polarisé, en figurant dans un même plan les trajectoires A, B, C, D, des molécules d'éther. On appelle *plan du rayon*, le plan dans lequel les vibrations s'exécutent; au contraire, *le plan de polarisation* (1820) est un plan perpendiculaire à la direction dans laquelle vibrent les molécules; on voit maintenant pourquoi un rayon polarisé présente des différences sur ses différentes faces.

Théorie de la polarisation rectiligne.

Ce que c'est qu'un rayon polarisé. Fig. 497.

1842. On conçoit qu'un rayon polarisé doit se réfléchir plus ou moins facilement suivant la direction des vibrations par rapport à la surface réfléchissante. La position des maxima et des minima (1819) prouve que la réflexion est plus facile quand les vibrations sont parallèles à cette surface. On voit même que les vibrations qui se font dans un plan perpendiculaire sont tout-à-fait incapables de se réfléchir sur les corps peu réfringents, lorsque l'incidence a lieu sous un certain angle qui est l'angle de polarisation.

Réflexion de la lumière polarisée.

1843. L'analyse démontre que les vibrations parallèles à la surface sont transformées par la réflexion en d'autres vibrations de même espèce, mais dirigées en sens contraire dans le cas où le second milieu est plus réfringent que le premier; tandis que les vibrations qui se font dans un plan perpendiculaire à sa surface sont transformées en d'autres vibrations, dirigées tantôt dans le même sens, tantôt en sens contraire, suivant que l'angle d'incidence est plus petit ou plus grand que l'angle de polarisation; les angles étant comptés avec la normale.

Sens du mouvement réfléchi.

1844. Nous pouvons maintenant nous rendre compte du changement que le plan de polarisation éprouve par la réflexion (1839). Considérons une section perpendiculaire au rayon incident; soit II le plan d'incidence, P P le plan de polarisation. Le molécule *m* vibre dans la direction *m n* per-

Changement du plan de polarisation. Fig. 498.

pendiculaire à P P; décomposons son mouvement en deux autres, l'un *m a*, parallèle à la surface, l'autre *m b*, dans le plan d'incidence; par la réflexion *m a* donnera *m a'* dirigé en sens inverse, et *m b* donnera *m b'* dans le même sens que *m b* si l'angle d'incidence est plus petit que l'angle de polarisation. Il est clair d'ailleurs que *m b'* ne coïncidera pas avec *m b*, puisqu'il sera dans un plan perpendiculaire au rayon réfléchi, plan que nous supposerons actuellement être celui de la figure. Puisque les vibrations réfléchies sont moindres, surtout quand elles se font dans un plan normal à la surface (1843) on aura $m a' < m a$, et surtout $m b' < m b$. En composant *m a'* avec *m b'*, on a *m n'* pour la vibration réfléchie; or, le plan P' P' perpendiculaire à la direction *m n'* est le plan de polarisation du rayon réfléchi; il se trouve ainsi de l'autre côté du plan d'incidence et rapproché de ce plan. En faisant la même construction pour le cas où l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de polarisation, on trouverait que le plan de polarisation se rapproche aussi du plan d'incidence, mais sans passer de l'autre côté.

Lumière naturelle ou neutre.

1845. On appelle lumière *naturelle* ou neutre celle qui ne présente aucun signe de polarisation; telle est la lumière directe du soleil, d'une bougie, celle des nuées et de la plupart des corps mal polis. Ce qui caractérise la lumière naturelle, c'est que les vibrations ne se font pas plutôt dans une direction que dans une autre, un rayon naturel se composant d'une suite de rayons très courts polarisés dans tous les azimuts.

Rayon naturel.

Rayon polarisé en partie.

1846. Un rayon polarisé en partie est un rayon où les vibrations, sans se faire dans un même azimut, ne se font cependant pas également dans tous.

Décomposition d'un rayon naturel en 2 rayons polarisés. Fig. 499.

1847. Fresnel a démontré qu'un rayon naturel équivalait à deux rayons polarisés à angle droit et ayant chacun une intensité moitié moindre. En effet, en décomposant chaque vibration en deux autres suivant deux directions rectangulaires, il est clair qu'à cause de la multitude des chances dans une certaine étendue, l'on doit trouver en somme autant de mouvement dans une direction que dans l'autre. Les deux rayons élémentaires ont donc la même intensité, et cette intensité pour chacun est la moitié de l'intensité totale. Il faut observer que dans ces deux rayons qui

peuvent tenir lieu de la lumière naturelle ; les nœuds ne coïncident pas, et que la différence des phases varie sans cesse ; car si les nœuds coïncidaient, on pourrait composer les deux rayons en un seul qui serait polarisé dans un plan faisant un angle de 45° avec les plans des rayons composants ; on aurait donc de la lumière polarisée, et non pas de la lumière naturelle.

Cause de la polarisation.

1848. Quand un rayon naturel tombe sur une surface, on peut concevoir que chaque vibration se décompose en deux autres, l'une parallèle à la surface, l'autre contenue dans un plan qui lui est perpendiculaire. En général les vibrations parallèles à la surface se réfléchissent de préférence ; tandis que les autres pénètrent en plus forte proportion ; il y a donc dans le rayon réfléchi et dans le rayon réfracté un sens de vibration dominant ; telle est la cause première de la polarisation par réflexion et par réfraction. La polarisation est nulle dans le cas de la réflexion totale, et très peu marquée sur les métaux, parce qu'alors les vibrations dans les deux sens sont également ou presque également réfléchies. Il est à noter que les ondulations successives d'un rayon polarisé ont en général des amplitudes différentes, car les vibrations naturelles changeant continuellement de direction, les composantes parallèles à la surface, par exemple, doivent être inégales lors même que les résultantes sont égales.

Intensité de la lumière réfléchie.

1849. La décomposition d'un rayon naturel en deux rayons polarisés donne la solution d'un problème qui avant Fresnel était jugé au-dessus de toutes les ressources de la théorie ; c'est de déterminer le rapport entre la lumière réfléchie et la lumière incidente quand celle-ci est naturelle. Soit 1 l'intensité du rayon incident ; nous pouvons le remplacer par deux autres d'intensité 1/2, polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan ; la lumière réfléchie pour le 1er sera $1/2\,\frac{\sin.^2(i-r)}{\sin.^2(i+r)}$; (1837), et pour le 2e $1/2\,\frac{\text{tg.}^2(i-r)}{\text{tg.}^2(i+r)}$; de sorte qu'en ajoutant ces deux quantités nous aurons toute la lumière réfléchie. Pour de très petits angles les sinus et les tangentes se confondent

avec les arcs, de sorte que l'intensité de la lumière réfléchie se réduit alors à $\left(\frac{i-r}{i+r}\right)$ ou bien $\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$, en observant que $i=nr$; et cette expression devient tout-à-fait rigoureuse dans le cas de l'incidence perpendiculaire. On trouve ainsi que la lumière réfléchie perpendiculairement par l'eau et par le verre forme les 0,019 et les 0,040 de la lumière incidente. N'oublions pas que les formules précédentes ne s'appliquent qu'aux corps transparents qui polarisent complétement la lumière.

Décomposition d'un rayon polarisé en partie. 1850. Un rayon polarisé partiellement peut de même qu'un rayon naturel se décomposer en deux rayons polarisés à angle droit; mais alors l'intensité de ceux-ci est évidemment inégale. Soit a celle de l'un, $a+b$ celle de l'autre; il est clair que le rayon polarisé en partie équivaut à deux rayons, l'un naturel d'intensité $2a$, l'autre complétement polarisé et dont l'intensité est b; ainsi nous pourrons nous représenter un rayon polarisé en partie par la superposition d'un rayon naturel et d'un rayon complétement polarisé. Fig. 500.

Intensité de la lumière polarisée par réflexion. 1851. Les deux rayons en lesquels on peut décomposer la lumière réfléchie (1850) n'ont pas la même intensité; celui qui est polarisé dans le plan de réflexion est toujours le plus intense, car $\frac{\sin.^2(i-r)}{\sin.^2(i+r)} = \frac{\text{tg.}^2(i-r)}{\text{tg.}^2(i+r)} \cdot \frac{\cos.^2(i-r)}{\cos.^2(i+r)}$, c'est-à-dire que son intensité est égale à celle de l'autre multipliée par un nombre plus grand que l'unité. Il y a donc nécessairement de la lumière polarisée dans le faisceau réfléchi et son intensité est égale à la différence des intensités des deux rayons. Sous l'angle de la polarisation, l'intensité est $1/2 \sin.^2(i-r) = 1/2 \left(\frac{n^2-1}{n^2+1}\right)^2$ (1837); ce qui donne pour l'eau les 34 millièmes et pour le verre les 74 millièmes de la lumière incidente.

Interférence des rayons polarisés dans un même plan. 1852. Les rayons polarisés dans un même plan interfèrent comme les rayons naturels; ainsi deux rayons homogènes et de même intensité étant superposés de manière que les nœuds de même espèce coïncident, les vitesses de vibration seront doublées et il en résultera un rayon d'intensité quadruple (1798). Au contraire l'interférence sera complète

et l'intensité nulle si l'on fait coïncider les nœuds d'espèce différente. Le calcul montre que l'intensité résultante est toujours la somme des intensités composantes quand la distance des nœuds est égale à 1/4 d'ondulation.

Condition de l'interférence complète.

1853. Pour observer l'interférence des rayons polarisés il suffit de mettre une pile polarisante devant le point lumineux dans l'appareil de Fresnel (1721); on voit ainsi que les conditions d'interférence pour la lumière polarisée sont en définitive les mêmes que pour la lumière naturelle (1723). Cependant il est bon d'observer que l'interférence ne peut être complète entre deux rayons que quand ils proviennent d'un même rayon polarisé. Il est certain qu'en polarisant les deux moitiés d'un rayon naturel on n'aurait pas deux rayons identiques (1847); et même les vibrations sur ces deux rayons seraient tout-à-fait indépendantes si les plans de polarisation étaient à angle droit. Qu'avec deux piles on polarise séparément à angle droit les deux faisceaux donnés par le prisme, il n'y aura plus aucun signe d'interférence, lors même qu'avec une troisième pile on ramènera les deux faisceaux au même plan de polarisation. Les deux premières piles ne font réellement que séparer les deux faisceaux polarisés à angle droit dont on peut concevoir que la lumière naturelle se compose; nous savons que les phases varient sans cesse d'un faisceau à l'autre; c'est donc comme si les rayons provenaient de deux points lumineux indépendants, auquel cas on ne peut jamais avoir d'interférence sensible; les intensités s'ajoutent tout simplement (1799).

Les rayons polarisés à angle droit n'interfèrent pas.

1854. Quand les rayons ne sont pas polarisés dans le même plan l'interférence n'est jamais complète, par la raison que deux forces qui ne sont pas directement opposées ne peuvent pas se détruire. Et quand les plans de polarisation sont à angle droit, il n'y a plus aucun signe d'interférence, lors même que les rayons proviennent d'un faisceau primitivement polarisé dans un seul sens. Dans ce cas chaque molécule décrit la diagonale d'un parallélogramme rectangle qui a pour côtés les écarts relatifs à chacun des deux rayons pris isolément. Puisque le carré de l'écart représente l'intensité de la lumière (1799) et que le carré de la diagonale est égal à la somme des carrés des deux côtés, il s'ensuit évidemment que l'intensité totale est la même

dans les deux cas; la différence de phase est ici sans influence; ainsi pour avoir l'intensité qui résulte de la superposition de deux rayons polarisés à angle droit, il suffira toujours de faire la somme des intensités partielles.

Polarisation rectiligne de la chaleur. 1855. Il résulte des expériences de MM. Bérard, Forbes et Melloni que la chaleur se polarise par réflexion et par réfraction suivant les mêmes lois que la lumière. Une pile de mica (1829) est le moyen le plus commode d'obtenir de la chaleur polarisée; on constate très bien la polarisation avec une seconde pile qui arrête les rayons ou les laisse arriver au thermo-multiplicateur, suivant que les plans de réfraction sont perpendiculaires ou parallèles. La chaleur arrêtée n'est ni absorbée ni détruite, elle est seulement réfléchie comme on peut s'en convaincre avec un thermo-multiplicateur placé de manière à la recevoir. M. Melloni a trouvé que l'angle de polarisation par réflexion sur le mica était de 33° 30′; pour la lumière, c'est 33°. 41′, on voit que la différence est très petite. Cet angle de polarisation se détermine simplement par l'inclinaison qu'il faut donner à une pile d'un grand nombre de lames pour avoir le maximum de chaleur transmise (1838).

M. Forbes avait pensé que les rayons des sources à basse température se polarisaient moins complétement, mais M. Melloni a démontré que toutes les espèces de rayons calorifiques se polarisaient également. Dans les expériences relatives à la polarisation de la chaleur, il faut que les lames de mica soient excessivement minces, et en même temps il est nécessaire qu'elles aient tout leur poli; si elles sont trop épaisses, certains rayons passent de préférence, alors on ne peut pas bien comparer la chaleur des différentes sources; si le poli est altéré, comme cela arrive aux piles préparées par le feu, il y a une réflexion diffuse qui s'exerce inégalement sur les différents rayons et peut faire croire à une polarisation inégale.

§ II. *Polarisation elliptique et circulaire.*

Polarisation elliptique. 1856. Nous avons dit que les molécules d'éther formant un rayon pouvaient décrire des ellipses (1798); lorsque le sens du mouvement est le même et que les grands axes des

ellipses sont tous dans un même plan, on a ce qu'on appelle la polarisation *elliptique*. Le calcul fait voir que les ellipses correspondantes aux différentes molécules sont toutes décrites en des temps égaux dont chacun est la durée d'une vibration moléculaire; le mouvement n'est pas uniforme; mais le rayon vecteur mené du centre de l'ellipse à la molécule trace des aires proportionnelles au temps. Les ellipses sont toutes parallèles entre elles et perpendiculaires au rayon; leurs centres se trouvent sur une même droite qui contient les positions d'équilibre des molécules. Quand la lumière se propage sans s'affaiblir, les ellipses sont égales; leur suite alors constitue un cylindre aplati A B C D sur lequel les molécules successives *m*, *m*, plus ou moins avancées dans leur révolution, forment une hélice dont le pas est précisément la longueur d'une ondulation; chacune des positions des molécules est une des phases de l'ondulation. Sur la surface de l'onde, les molécules ayant la même phase, elles peuvent décrire leurs ellipses sans s'éloigner ni se rapprocher les unes des autres; c'est du moins ce qui a lieu quand la polarisation et l'intensité sont uniformes; seulement les positions d'équilibre qui étaient en *a*, *a'*, par exemple, se trouvent en *b*, *b'*. Fig. 501. Fig. 502.

On a la polarisation circulaire lorsque la trajectoire des molécules d'éther est un cercle, et il est évident que la polarisation circulaire n'est qu'un cas particulier de la polarisation elliptique, puisque le cercle n'est qu'une ellipse dont les axes sont égaux. D'après la définition théorique du plan de polarisation (1841) on voit que ce plan change continuellement, quand le trajectoire de la molécule d'éther est une courbe; dans la polarisation elliptique la direction dominante est le petit axe de l'ellipse; mais dans la polarisation circulaire la direction reste tout-à-fait indéterminée. Dans ce dernier cas les différences entre les différentes faces du rayon (1818) s'évanouissent; mais il reste toujours ce caractère commun aux trois espèces de polarisation, que la direction du mouvement est la même sur toute la longueur du rayon pour les molécules qui ont la même phase. Polarisation circulaire.

1857. La polarisation elliptique se produit toutes les fois que deux rayons polarisés à angle droit se superposent sans que leurs nœuds coïncident; la polarisation est circulaire Théorie de leur production.

dans le cas particulier où les rayons ont la même intensité, et où la distance des nœuds est précisément le quart d'une ondulation. Considérons ce dernier cas, les autres se concevront aisément par analogie. Supposons pour fixer les idées que les vibrations de l'un des rayons soient verticales, celles

Fig. 503. de l'autre étant horizontales; soit A B le diagramme d'une ondulation prise sur l'un des rayons; représentons par o, 5, 6, 5, o, — 5, — 6, — 5, o les écarts pour les phases distantes de 1/8 d'ondulation, ces écarts ayant les signes + ou — suivant qu'ils se font dans un sens ou dans l'autre;

Fig. 504. enfin soit M une molécule d'éther à laquelle parviennent les vibrations. Cette molécule, à des intervalles de temps égaux à la huitième partie de la durée d'une vibration, reçoit à la fois des impulsions représentées par o et 6, 5 et 5, 6 et o, 5 et — 5, etc., ce qui avec les impulsions intermédiaires doit évidemment produire un mouvement en cercle. Le diamètre des cercles successifs peut varier de même que l'amplitude des ondulations successives dans les rayons composants.

Puisque les rayons polarisés à angle droit n'interfèrent pas (1854) il suffit de faire la somme des intensités de deux rayons polarisés en ligne droite, quand on veut avoir l'intensité d'un rayon polarisé circulairement ou elliptiquement.

Leur origine dans la réflexion et la réfraction.

1° Différence de phase.

1858. La polarisation elliptique et la polarisation circulaire peuvent se produire par la réflexion et par la réfraction; pour le concevoir il faut d'abord observer que chaque vibration rectiligne dans le rayon incident peut en général se décomposer en deux autres, l'une perpendiculaire au plan d'incidence, l'autre contenue dans ce plan, et que les choses se passent comme si les deux rayons composants se réfléchissaient et se réfractaient indépendamment l'un de l'autre. Or sur certains milieux, notamment sur les métaux et dans le cas de la réflexion totale, ces deux rayons éprouvent des changements de phase très différents, de sorte que la lumière réfléchie ou réfractée se trouve formée par la superposition de deux rayons dont les nœuds ne coïncident plus, ce qui entraîne un mouvement curviligne des molécules de l'éther, comme nous venons de le voir tout-à-l'heure pour le cas particulier de la polarisation circulaire. La différence

de phase varie avec l'incidence ; sur les métaux elle peut aller jusqu'à une demi-ondulation, elle ne va pas si loin dans le cas de la réflexion totale.

1859. Il est évident d'ailleurs que la courbe décrite par les molécules d'éther dépend de la proportion suivant laquelle se réfléchissent les vibrations parallèles à la surface et les vibrations contenues dans un plan perpendiculaire. Voici un petit tableau qui donnera une idée de cette proportion pour quatre métaux, sous l'*incidence principale*, qui est celle où la différence de phase est d'un quart d'ondulation. L'intensité de la lumière incidente est prise pour unité ; la proportion la plus forte est toujours pour les vibrations parallèles à la surface. 2° Différence d'intensité.

Argent.	Mercure.	Métal des miroirs.	Acier.
73°	78°.27'	76°	75°
0,96	0,94	0,90	0,86
0,79	0,46	0,35	0,28

Dans le cas de la réflexion totale à l'intérieur d'un milieu transparent, la proportion pour les deux genres de vibration est toujours la même.

1860. Supposons qu'on fasse réfléchir un rayon polarisé dans un azimut de 45°, les deux rayons composants ont alors la même intensité ; ils restent encore égaux entre eux si la réflexion est totale, car le calcul démontre que dans ce cas l'intensité de la lumière réfléchie ne dépend pas de la direction des vibrations. Le calcul démontre aussi que sous une incidence de 54° 1/2 dans le verre dont l'indice est 1,51, la différence de phase entre les deux rayons qui composent la lumière réfléchie est précisément égale à 1/8 d'ondulation ; par conséquent après deux réflexions consécutives on doit avoir de la lumière polarisée circulairement : c'est ce que Fresnel a vérifié avec un parallélépipède droit A B C D, dont les angles aigus étaient de 54° 1/2 et le rapport des côtés tel que le rayon se trouvait perpendiculaire aux faces d'entrée et de sortie. La polarisation circulaire pourrait s'obtenir par une seule réflexion totale dans le diamant sous l'angle de 33° environ. On l'obtiendrait aussi par une seule réflexion sur les métaux sous l'incidence principale (1859) ; sur l'argent, le mercure, le métal des miroirs et l'acier ; les azi- Cas de polarisation circulaire. Fig. 505.

muts de polarisation du rayon incident devraient être 47° 47′, 55°, 58° et 60° 17′.

Caractères de la lumière polarisée circulairement. 1861. La lumière polarisée circulairement ne présente aucune différence d'intensité quand on l'examine avec l'analyseur, les piles de glaces ont la tourmaline (1830); sous ce rapport elle ressemble entièrement à la lumière naturelle, et se distingue par conséquent très bien de la lumière douée de la polarisation rectiligne ou elliptique. Maintenant un caractère qui la distingue de la lumière naturelle, c'est que par deux réflexions à l'intérieur du verre sous l'angle de 54°, un rayon polarisé circulairement se trouve *restauré*, c'est-à-dire ramené à la polarisation rectiligne; il se produit alors une différence de phase égale à la première, ce qui rétablit la coïncidence des nœuds. Les réflexions totales n'altérant pas l'égalité des rayons composants, l'azimut du rayon restauré se retrouve de 45°. Ces caractères peuvent se constater sur la lumière blanche, quoiqu'à la rigueur elle ne soit pas tout entière polarisée circulairement. Nous verrons encore un autre moyen de distinction dans l'absence des couleurs produites par la double réfraction circulaire (1937).

Cas de polarisation elliptique. 1862. Quand avec le prisme de Fresnel l'azimut de polarisation du rayon incident n'est pas de 45°, les deux faisceaux dont se compose le rayon réfléchi sont inégaux en intensité alors on a la polarisation elliptique. En général, c'est cette polarisation qui se produit quand un rayon *polarisé en ligne droite* éprouve une réflexion totale ou une réflexion sur les substances qui ne polarisent pas complétement la lumière, ce qui est particulièrement le cas des métaux. En supposant le rayon incident polarisé dans un azimut de 45°, on voit que sous l'incidence principale (1859), l'argent produit une polarisation presque circulaire, tandis que pour les autres métaux, et surtout pour l'acier, les axes de l'ellipse sont très inégaux.

On a un exemple de polarisation elliptique par réfraction, lorsque la lumière polarisée est transmise à travers une feuille d'or.

Caractère de la lumière polarisée elliptiquement. 1863. La lumière douée de la polarisation elliptique, quand les axes de l'ellipse sont peu inégaux, se confond sensiblement avec la lumière polarisée circulairement; au contraire, si l'inégalité est très grande, elle ressemble à la lumière po-

larisée en ligne droite. En général, elle se comporte comme la lumière polarisée en partie ; ainsi sans s'éteindre complétement elle donne des minima par réflexion, par réfraction et avec la tourmaline. Mais son caractère distinctif, c'est qu'à l'aide d'une ou deux réflexions métalliques sous des angles convenables on peut lui donner la polarisation rectiligne. Il suffit, en effet, pour cela, que la différence de phase soit portée à une demi-ondulation, puisque alors les nœuds coïncident. On pourrait aussi employer des réflexions totales ; par exemple, deux réflexions totales dans le verre sous l'angle de 54° suffiraient pour restaurer un rayon qui aurait été polarisé par les métaux de la table (1859) sous les angles indiqués ; et l'on ne pourrait pas le confondre avec un rayon polarisé circulairement puisque les rayons composants ayant des intensités différentes, l'azimut du rayon restauré ne serait pas de 45°.

Dépolarisation apparente.

1864. On dit quelquefois que la réflexion totale et la réflexion sur les métaux *dépolarisent* la lumière ; en effet, par ces réflexions les signes de polarisation *rectiligne* disparaissent entièrement ou en partie, pourvu que le rayon incident ne soit polarisé ni parallèlement ni perpendiculairement au plan d'incidence. Mais nous voyons maintenant qu'il ne se produit pas alors de lumière naturelle, et que c'est seulement un autre genre de polarisation qui s'établit.

Couleurs développées par des réflexions métalliques.

1865. On obtient des couleurs fort remarquables avec la lumière douée de la polarisation elliptique ou circulaire, lorsqu'après lui avoir fait subir plusieurs réflexions sur des métaux, on la ramène à la polarisation rectiligne dans un plan qui ne soit ni parallèle ni perpendiculaire au plan de réflexion ; on peut se servir pour cela d'une pile de glaces ou de tout autre moyen dépolarisateur. Pour concevoir la formation de ces couleurs, nous observerons qu'à égalité d'incidence la différence de phase n'est pas la même pour les différents rayons ; si elle est d'un quart d'ondulation pour les rayons verts, elle est plus grande ou plus petite pour les autres, et on peut dire qu'à la rigueur la réflexion ne donne jamais à la fois la polarisation circulaire ou même la polarisation elliptique à tous les rayons qui composent la lumière blanche. Pour une ou deux réflexions, l'inégalité des différences de phase est peu importante, mais elle s'agrandit à me-



sure que les réflexions se multiplient. Il en résulte que si, pour qu'ils puissent interférer, on ramène à un même plan de polarisation les deux rayons polarisés à angle droit qui composent la lumière polarisée elliptiquement, les interférences se trouvent inégales dans les différents rayons; le vert, par exemple, peut être entièrement détruit, ce qui laisse dominer le rouge, et en général les proportions qui constituaient la lumière blanche se trouvent altérées. Nous reviendrons sur ces couleurs en parlant de celles que donnent les lames cristallisées: la théorie est la même.

Action des métaux sur la lumière naturelle.

1866. Un rayon naturel se composant en réalité de rayons très courts polarisés dans tous les azimuts, on voit que par la réflexion totale, par la réflexion sur les métaux et sur les corps opaques en général, chacun de ces rayons prend la polarisation elliptique. Les ellipses décrites alors par les molécules d'éther ont toujours leurs plans perpendiculaires au rayon, mais le sens du mouvement change irrégulièrement d'une ellipse à l'autre, le rapport des axes change continuellement, et les grands axes ont toutes les inclinaisons possibles; en général, cependant, ils tendent à devenir parallèles à la surface réfléchissante; aussi trouve-t-on un peu de lumière qui semble polarisée en ligne droite dans le plan d'incidence. D'après les expériences de M. Brewster, la proportion de cette lumière va en croissant sur l'argent, le mercure, le métal des miroirs et l'acier; l'*angle maximum de polarisation*, qu'on appelle aussi l'*incidence principale*, est précisément l'angle qui donne une différence de phase égale à 1/4 d'ondulation (1839).

Polarisation rectiligne par les métaux.

1867. Par des réflexions répétées sur les métaux, la lumière naturelle finit par se polariser complétement dans le plan d'incidence. Sur l'acier 8 réflexions suffisent, il en faut environ 36 sur l'argent. Pour concevoir cet effet, observons qu'un rayon polarisé dans un azimut de 45° étant réfléchi sur l'acier sous l'angle de 78°, se trouve avoir la polarisation elliptique et qu'une seconde réflexion sous le même angle le ramène à la polarisation rectiligne (1863). Or, l'expérience prouve que son plan de polarisation est alors rapproché du plan d'incidence; l'azimut diminue ainsi à chaque réflexion paire, et à la 4e les deux plans se confondent sensiblement. Maintenant nous savons qu'un rayon naturel

peut être assimilé à deux rayons polarisés à angle droit, et on est libre de supposer ceux-ci polarisés dans les azimuts de 45° de part et d'autre du plan d'incidence. S'il faut un plus grand nombre de réflexions sur l'argent, c'est que l'intensité est à peu près la même dans les deux rayons qui diffèrent de phase (1859); on comprend, d'après cela, pourquoi la lumière naturelle ne peut se polariser en ligne droite par aucun nombre de réflexions totales.

1868. D'après les calculs de M. Cauchy, lesquels s'accordent avec les expériences connues, l'intensité de la lumière incidente étant prise pour unité, l'intensité de la lumière réfléchie par l'argent, le mercure, le métal des miroirs et l'acier sous l'incidence perpendiculaire est — Intensité de la lumière réfléchie.

0,88 0,70 0,62 0,57

et sous l'incidence principale (1859)

0,88 0,70 0,62 0,56

Si l'on considère en particulier l'acier, la lumière réfléchie sous les incidences de

	0°	10°	30°	50°	73°	75°
sera	0,55	0,55	0,54	0,54	0,55	0,56

La lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire sur les corps transparents est généralement très faible; au contraire, elle est, comme on voit, fort considérable sur les métaux; elle peut égaler ou même surpasser la moitié de la lumière incidente. Dans le passage de l'incidence perpendiculaire à l'incidence de 73°, l'accroissement est presque insensible. La légère diminution indiquée par le calcul malgré l'accroissement d'obliquité a été observée par M. Potter.

1869. Le calcul démontre que dans le cas de la réflexion dite totale, l'amplitude des vibrations est aussi grande dans le rayon réfléchi que dans le rayon incident; d'où il suit que l'*intensité* de la lumière reste la même. Quant à la *quantité*, elle doit être moindre, car une partie du mouvement pénètre et s'éteint dans le second milieu. Un fait bien remarquable, c'est que l'intensité est encore presque aussi grande dans le voisinage de la réflexion totale, quoique alors il existe un rayon réfracté dont l'intensité peut être quatre — Cas de la réflexion totale.

fois plus considérable que celle de la lumière incidente. Le rapport des intensités arrive même à 9, avec le verre, quand on emploie de la lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence. Cette multiplication apparente de la lumière a été annoncée par M. Cauchy et vérifiée par M. Kessler. Dans tous les cas, cependant, la somme des forces vives reste constante; on le reconnaît quand on a égard aux masses d'éther mises en mouvement suivant chaque rayon; cette masse est extrêmement petite dans le rayon réfracté, qui est d'une minceur excessive.

Influence mutuelle des rayons polarisés circulairement.

1870. Deux rayons polarisés circulairement dans le même sens interfèrent absolument comme deux rayons naturels; mais deux rayons polarisés circulairement en sens inverse n'interfèrent pas; l'intensité résultante est toujours la somme des intensités partielles. Lorsqu'ils sont égaux, ils forment par leur superposition un rayon polarisé en ligne droite, et le seul effet de la différence de marche est de faire varier le plan de polarisation de ce rayon. Pour concevoir cette composition de mouvement, soient A B C D, A′ B′ C′ D′ les deux cercles que décrirait le molécule M à un instant donné sous l'influence de chaque rayon pris isolément. D'abord, en supposant qu'il n'y ait pas de différence de marche, M tend à prendre, par exemple, les écarts A et A′ qui se détruisent, puis successivement les écarts B et B′, C et C′, etc., qui se composent pour former en définitive un mouvement alternatif en ligne droite. Admettons maintenant qu'il y ait une différence d'un quart d'ondulation dans la marche; alors les écarts qui se composent ensemble sont A′ et B, B′ et C, etc., ce qui donne encore un mouvement rectiligne alternatif, mais incliné de 45° sur la direction primitive; l'angle entre les plans de polarisation est évidemment aussi de 45°, et en général $\frac{1}{n}$ d'ondulation dans la différence de marche répond à $\frac{1}{n}$ de 180° dans l'inclinaison de ces plans.

Fig. 506. Fig. 507. Fig. 508.

Le sens du mouvement dans les rayons polarisés circulairement se détermine par rapport à l'observateur qui reçoit ces rayons; ainsi le mouvement est de gauche à droite dans le rayon dont on voit la coupe en A B C D; d'après cela, il est clair que la rotation du plan de polarisation se

fait vers la droite de l'observateur quand c'est le rayon polarisé de gauche à droite qui est en avance.

1871. Le professeur Forbes a montré qu'on pouvait polariser circulairement la chaleur à l'aide de deux réflexions totales. Pour cela, entre deux piles polarisantes de mica, il a placé un prisme rhomboïdal de sel gemme semblable à celui de Fresnel (1860); lorsque le rayon était polarisé par la 1re pile dans un plan parallèle ou perpendiculaire à celui de la réflexion totale, la chaleur émergente avait les caractères ordinaires des rayons polarisés, c'est-à-dire que la 2me pile pouvait l'arrêter ou la transmettre suivant la position qu'on lui donnait. Mais quand le plan de polarisation du rayon incident faisait un angle de 45° avec le plan de réflexion, toute trace de polarisation avait disparu, de sorte que dans ce cas la chaleur se comportait absolument comme la lumière. Polarisation circulaire de la chaleur.

CHAPITRE IX.

ACTION DES MILIEUX BIRÉFRINGENTS SUR LA LUMIÈRE NATURELLE.

§ I. *Phénomènes généraux.*

1872. Certains milieux ont la propriété de diviser en deux chaque rayon qui les pénètre; cette division de la lumière est presque toujours accompagnée de réfraction, aussi lui donne-t-on le nom de *double réfraction*. On appelle milieux *biréfringents* ceux dans lesquels la double réfraction s'observe; la plupart des substances cristallisées sont des milieux biréfringents. Double réfraction.

Pour voir le phénomène de la double réfraction, il suffit de faire tomber un rayon de soleil SI sur un cristal naturel de spath d'Islande ABA'B', ayant une épaisseur de quelques centimètres; on a deux rayons, IO et IE, qui émergent ensuite parallèlement au rayon incident, mais bien séparés. Il faut remarquer qu'ils se propagent tous deux en ligne droite dans l'intérieur du cristal et que leur intensité est la même, de sorte que la lumière se partage également. On peut encore voir la double réfraction Fig. 509.

en posant le cristal sur les caractères d'un livre : chaque lettre alors paraît double. En général, pour obtenir une séparation bien marquée des rayons, il est nécessaire de donner aux milieux biréfringents la forme d'un prisme ; les rayons dans ce cas ne sortent plus parallèles, et leur écartement est aussi grand qu'on veut.

C'est à Huygens que l'on doit, sinon la découverte de la double réfraction, du moins le premier travail important sur ce phénomène.

Inégalité de vitesse.

1873. L'inégalité de réfraction entraîne l'inégalité de vitesse ; ainsi dans les milieux biréfringents les deux rayons ont en général des vitesses différentes. Nous verrons que l'inégalité de vitesse subsiste quelquefois, quoique la direction soit la même ; cela arrive dans certains cas d'incidence perpendiculaire ; alors il n'y a réellement plus de réfraction, et on peut dire que la *diactinie* ou la division de la lumière en deux rayons est, plutôt que la double réfraction, le vrai caractère des milieux qui nous occupent.

Réflexion par les milieux biréfringents. Fig. 509.

1874. Quand la lumière tombe sur la surface extérieure d'un milieu biréfringent, il n'y a qu'un seul rayon réfléchi ; mais il y en a deux dans le cas de l'incidence intérieure, de sorte qu'un seul rayon extérieur SI donne naissance à quatre rayons réfléchis intérieurement, OO′, OE′, EO′, EE′. En général, aucun de ces rayons ne suit les lois ordinaires de la réflexion.

D'après les expériences de Potter, la quantité de lumière réfléchie à la surface extérieure d'un milieu biréfringent, varie un peu suivant la direction du plan d'incidence.

M. Brewster a reconnu que l'angle de polarisation pouvait varier sur les différentes faces d'un milieu biréfringent, et que sur une même face il pouvait aussi varier suivant le plan d'incidence. En général, le rayon réfléchi sous l'angle de polarisation n'est perpendiculaire à aucun des deux rayons réfractés : c'est du moins ce qui résulte des expériences de M. Quet.

Polarisation par double réfraction.

1875. Les milieux biréfringents polarisent toujours la lumière en même temps qu'ils la divisent en deux faisceaux. Dans quelques cas particuliers la polarisation est circulaire ou elliptique, mais en général elle est rectiligne ; les plans de polarisation des deux faisceaux sont alors à angle droit ;

c'est ce qu'on peut constater en examinant avec un polariscope (1830) les rayons émergents EM, OP, ou la double image d'un objet quelconque. Ainsi avec une tourmaline qu'on tourne dans son plan, les deux images disparaissent alternativement pour des positions rectangulaires de l'axe. Fig. 509.

Quand les milieux biréfringents ne sont pas taillés en prismes et quand le faisceau incident est fort large, les deux rayons se superposent, et alors les signes de polarisation disparaissent.

Inégale absorption des milieux biréfringents.

1876. La division de la lumière naturelle par la double réfraction se fait toujours en deux parties égales; dans les milieux incolores l'égalité subsiste, l'absorption (1393) ne s'exerçant pas plus sur un des rayons que sur l'autre. Mais dans les milieux biréfringents colorés l'absorption est inégale, ce qui produit des différences souvent très marquées dans l'intensité et la couleur des deux images. Par exemple, si on regarde un point lumineux avec une tourmaline taillée en prisme, on a deux images d'intensité très différentes; l'une d'elles disparaît même tout-à-fait quand on regarde à travers la partie la plus épaisse du prisme. L'inégalité de l'absorption est encore très marquée dans le cristal de roche *enfumé*. En taillant des prismes dans différents sens avec les milieux biréfringents, on reconnaît que l'inégalité d'apsorption varie suivant les directions que l'on considère; telle épaisseur qui n'éteint pas un rayon dans une certaine direction, peut l'éteindre dans une autre.

Les différences varient encore pour chacun des rayons qui composent la lumière blanche; il en résulte que les deux images sont en général de couleur différente. Avec une tourmaline verte, l'image qui doit s'éteindre est d'un vert jaune très prononcé, tandis que l'autre est presque blanche; avec l'améthyste, on peut avoir une image rose et une image bleue; avec une certaine variété de topaze d'un jaune rosé, on a une image rose et une image jaune. Les joailliers chauffent jusqu'au rouge cette variété de topaze qui prend une couleur rose plus franche; on a ainsi ce qu'on appelle une topaze *brûlée*. M. Brewster a reconnu que l'image, primitivement jaune, se trouvait alors blanche. On voit que l'action de la chaleur consiste à modifier l'absorption pour l'un des rayons donnés par la double réfraction.

Dichroïsme. 1877. En général, les milieux biréfringents colorés présentent des couleurs différentes quand on les regarde dans différentes directions ; c'est en cela que consiste le *dichroïsme* ou plutôt le *polychroïsme*, car il peut y avoir un grand nombre de teintes différentes ; mais ordinairement on ne fait attention qu'aux cas extrêmes. Ainsi une tourmaline peut être jaune suivant son axe, et verte dans une direction perpendiculaire. La *cordiérite* ou *dichroïte* est bleue dans un sens et jaune brunâtre dans un autre ; certaines topazes, examinées dans trois sens différents, paraissent successivement roses, violettes et d'un blanc jaunâtre. Le dichroïsme provient évidemment de la manière dont l'absorption s'exerce dans les milieux biréfringents ; et voici à quoi reviennent en définitive, d'après M. Babinet, les effets de cette absorption : tout cristal biréfringent coloré, éclairé par de la lumière neutre, peut être considéré comme donnant passage à une certaine quantité de lumière colorée *non polarisée*, laquelle passe librement dans tous les sens ; et de plus à une certaine quantité de lumière polarisée qui éprouve une absorption plus ou moins forte suivant sa direction ; il en résulte une série nombreuse de nuances, depuis celle qui appartient à la lumière non polarisée pure, l'autre étant détruite par l'absorption, jusqu'à celle formée de l'ensemble de la lumière non polarisée et de la lumière polarisée tout entière.

Emploi de l'absorption pour arrêter ou fournir de la lumière polarisée. 1878. En déterminant le sens de la polarisation dans les deux images données par un prisme de tourmaline, il est facile de s'assurer que cette pierre absorbe spécialement la lumière polarisée parallèlement à son axe, ce qui rend compte de son emploi comme polariscope (1830).

Quant à la lumière transmise, elle est polarisée perpendiculairement à l'axe ; comme elle passe seule quand l'épaisseur est un peu grande, on conçoit que la tourmaline, sans être taillée en prisme, peut très bien isoler de la lumière polarisée ; les plaques qui servent de polariscopes s'emploient souvent à ce nouvel usage ; seulement le rayon transmis ne forme pas, à beaucoup près, la moitié de la lumière incidente ; et en outre il est plus ou moins coloré. Le quartz enfumé taillé parallèlement à l'axe ; et l'agate taillée parallèlement à ses couches, peuvent, jusqu'à un certain

point, remplacer la tourmaline. Dans l'agate il y a ceci de particulier, que l'un des rayons s'affaiblit non point par une véritable absorption, mais par des réflexions irrégulières qu'il éprouve dans tout son trajet; aussi quand on observe les deux images, on voit que l'une est nette, tandis que l'autre est diffuse; il semble que le milieu soit transparent pour l'un des rayons, et seulement demi-transparent pour l'autre. Le plan de polarisation du rayon transmis est parallèle aux couches de l'agate et à l'axe du quartz; c'est le contraire de ce qui a lieu pour la tourmaline.

1879. Les milieux biréfringents peuvent se reconnaître par la double réfraction même, du moins quand elle est assez énergique pour séparer sensiblement les rayons :—par la polarisation; mais ce moyen n'est applicable que quand les rayons sont séparés soit par la double réfraction, soit par l'inégalité d'absorption;—par le dichroïsme qui ne s'observe en effet que dans les milieux biréfringents, mais il faut que ceux-ci soient colorés. L'action sur la lumière polarisée fournit des moyens plus généraux et beaucoup plus délicats que nous étudierons bientôt; mais déjà nous pouvons en indiquer un qu'on emploie très souvent, et qui est fondé sur la propriété que vient de nous présenter la tourmaline. Dans une pince à anneaux PPP se trouvent deux petits disques DD, D'D', où sont enchâssées deux tourmalines T, T'; les disques tournent à frottement dans les anneaux, de sorte qu'on peut croiser quand on veut les axes des tourmalines. Quand ces axes sont croisés, la lumière ne traverse pas le système, car la première tourmaline donne un rayon polarisé perpendiculairement à son axe, et ce rayon se trouve ainsi justement dans les conditions où la deuxième tourmaline, par sa position même, ne peut que l'absorber. Maintenant si on met une substance biréfringente entre les deux tourmalines, du cristal de roche, par exemple, le rayon transmis par la première tourmaline sera divisé par le cristal en deux rayons polarisés à angle droit, et par conséquent la deuxième tourmaline laissera toujours passer une partie de la lumière, quelque position qu'on lui donne. Il n'en serait pas de même si on interposait un morceau de verre ou de cristal ordinaire, la polarisation de la lumière transmise par la première tourmaline ne serait pas changée et le système resterait

Moyen de reconnaître les milieux biréfringents.

Pince à tourmalines. Fig. 510.

opaque. Quelquefois l'opacité subsiste pour des positions particulières de la lame biréfringente, mais il est facile de changer ces positions (1930).

Substances douées de la double réfraction.

1880. Les substances cristallisées jouissent en général de la double réfraction; c'est même dans ces milieux que le phénomène est le plus marqué; il faut excepter les cristaux dont la forme primitive est un polyèdre régulier, par exemple le sel marin qui cristallise en cubes, l'alun qui cristallise en octaèdres réguliers, etc. Ces cristaux et les corps homogènes deviennent biréfringents quand leur structure est altérée par des moyens mécaniques ou par la chaleur, comme nous le verrons par la suite. Enfin on observe la double réfraction dans la plupart des substances organisées ou d'origine organique, comme la corne, les poils, les plumes, le cristallin de l'œil, la fécule, et même dans certains liquides tels que l'essence de térébenthine, les dissolutions de sucre, etc.

Après avoir donné une idée de l'action des substances biréfringentes sur la lumière naturelle, nous allons étudier en particulier les cristaux; nous ne nous occuperons des autres substances qu'en parlant de l'action des milieux biréfringents sur la lumière polarisée.

Axes optiques des cristaux.

1881. En général, dans les cristaux biréfringents il ne peut se propager que de la lumière polarisée; pour chaque direction, cette lumière ne peut être polarisée que dans deux sens déterminés, et la vitesse de propagation est différente pour les deux sens de polarisation. Mais il y a une ou deux directions suivant lesquelles la lumière peut se propager, quel que soit son plan de polarisation et toujours avec la même vitesse; ce sont ces directions qu'on appelle *axes optiques*; si on se rappelle la constitution de la lumière naturelle, on voit que les axes optiques des cristaux sont *des directions suivant lesquelles la lumière naturelle peut se propager.*

Quand l'axe est unique, la lumière qui le parcourt sort du cristal sans se diviser, même quand la face de sortie est oblique; elle entre aussi sans se diviser, pourvu que la face d'incidence soit perpendiculaire. Il n'en est plus de même dans les cristaux à deux axes, la lumière se subdivise toujours tant à l'entrée qu'à la sortie; ainsi dans ces deux

classes de cristaux les propriétés des axes ne sont pas identiques par rapport à la lumière extérieure.

Observons qu'un axe optique dans un cristal n'est réellement pas une ligne unique et fixe comme l'axe de la terre, par exemple; c'est une *direction* qui comprend une infinité de lignes parallèles; on peut mener un axe optique par chacun des points du cristal, de même qu'on peut mener une verticale ou faire tomber un fil à plomb sur chacun des points d'un corps.

1882. Il y a des relations remarquables entre les axes optiques et les formes des cristaux, du moins quand ceux-ci sont réduits à leur forme primitive ou la plus simple. Dans les cristaux à un axe il existe une ligne unique de symétrie qu'on appelle axe de cristallisation et qui est précisément l'axe optique; les faces et les arêtes sont alors également inclinées et à égale distance par rapport à cet axe; c'est ce qu'on observe dans les rhomboèdres et les prismes droits à base carrée. Dans les cristaux à deux axes il n'y a pas de symétrie; c'est le cas des prismes obliques ou des prismes droits dont la base n'est pas un carré. Relations avec la forme cristalline.

§ II. *Cristaux à un axe.*

1883. Dans les cristaux à un axe, on appelle section principale toute section faite par l'axe; on considère particulièrement les sections qui tombent perpendiculairement sur les faces, soit naturelles, soit artificielles. Puisqu'il y a une infinité d'axes parallèles, on conçoit qu'il y a une infinité de sections principales; elles coupent évidemment les faces suivant des lignes parallèles. Section principale.

1884. Des deux rayons qu'on voit dans les cristaux à un axe, l'un, qu'on appelle *ordinaire*, suit les lois ordinaires de la réfraction; l'autre obéit en général à des lois différentes; aussi l'appelle-t-on rayon *extraordinaire*. On reconnaît aisément le rayon ordinaire à ce qu'il est polarisé dans la section principale, tandis que le rayon extraordinaire l'est perpendiculairement à cette section Quand le plan d'incidence est dans la section principale, le rayon extraordinaire se réfracte sans sortir de cette section, de sorte qu'il obéit à l'une des lois de la réfraction; mais il n'obéit pas à la loi de Descartes. Rayon ordinaire. Rayon extraordinaire.

Les deux lois sont observées quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe ; alors le rayon extraordinaire a un indice de réfraction qu'on peut déterminer avec un prisme taillé dans le cristal, de manière que son arête soit parallèle à l'axe.

Cristaux positifs. —négatifs. 1885. Les cristaux se divisent en *positifs* et en *négatifs*, suivant que l'indice extraordinaire est plus grand ou plus petit que l'indice ordinaire. Le quartz ou cristal de roche, le nitrate de soude, la glace, sont positifs ; le spath d'Islande, la tourmaline, le saphir, l'émeraude, le prussiate de potasse, le phosphate de chaux, sont négatifs. Il est à noter que dans les cristaux positifs le rayon extraordinaire se trouve réfracté vers l'axe comme s'il y avait attraction, tandis que dans les cristaux négatifs il est écarté de l'axe comme s'il y avait répulsion ; c'est de là que viennent les noms de cristaux *attractifs* et de cristaux *répulsifs* qu'on emploie quelquefois. Nous prendrons comme exemples pour l'étude de la double réfraction le spath d'Islande et le cristal de roche.

Spath d'Islande. Fig. 511. 1886. C'est sur le spath d'Islande que la double réfraction a été d'abord observée. Cette substance est du carbonate de chaux ; sa forme primitive est un rhomboèdre, c'est-à-dire un solide dont les six faces toutes égales et semblables sont des lozanges ; on trouve des cristaux bien transparents de plusieurs centimètres d'épaisseur et présentant des faces parfaitement polies soit naturelles, soit artificielles ; le clivage est ici très facile. Les angles dièdres sont de 105° 5′ et 74° 55′, les angles plans de 101° 55′ et 78° 5′. La droite A A′ qui joint les angles trièdres obtus est l'axe ; chacune des six faces se trouve également inclinée par rapport à l'axe, l'angle est de 45° 23′. La section principale A B A′ B′ est un parallélogramme obliquangle formé par les petites diagonales A B′, A′ B. Les angles de ce parallélogramme sont de 109° 8′ et 70° 52′ ; on voit que l'angle de l'axe avec les arêtes est de 63° 45′. Il est clair qu'on peut mener deux autres sections principales toutes pareilles.

Remarque sur l'axe. 1887. Si on divise le rhomboïde en une infinité d'autres par le clivage, chacun d'eux a son axe ; et tous ces axes sont évidemment parallèles quand les rhomboïdes élémentaires se trouvent à leur place dans le cristal entier ; on peut donc par chaque point du cristal concevoir un axe et une

section principale comme nous l'avons dit (1881). Souvent le rhomboïde a des faces inégales, alors l'axe n'est plus la droite qui joint les angles obtus, et la section principale ne passe plus par la diagonale des faces; les directions que nous avons assignées ne se rapportent qu'au rhomboïde parfait, qu'il est toujours assez facile de se figurer en ajoutant ou en retranchant quelque chose au cristal qu'on a sous les yeux.

Incidence perpendiculaire sur une face naturelle. Fig. 509.

1888. Lorsque l'incidence a lieu perpendiculairement sur une face naturelle le rayon ordinaire I O traverse sans se dévier, tandis que le rayon extraordinaire I E s'écarte en faisant avec le premier un angle très sensible, car il est de 6° 12'. *Les deux rayons sont toujours dans la section principale*, que d'après cela il est facile d'assigner quand même le cristal ne présente pas la forme primitive. Si on conçoit l'axe I A' par le point d'incidence, on voit que le rayon extraordinaire se trouve rejeté vers le *petit* angle solide B' de la seconde face, *comme si l'axe exerçait une répulsion*. Les deux rayons émergent ensuite parallèlement; leur distance est d'un peu plus d'un millimètre si l'épaisseur du cristal est d'un centimètre; elle serait évidemment double si l'épaisseur était double, puisque l'angle d'écart est toujours le même. Quand on fait tourner le rhomboïde de manière que l'incidence reste perpendiculaire, la section principale tourne ainsi que le rayon extraordinaire dont l'extrémité décrit alors un cercle au centre duquel aboutit le rayon ordinaire. Celui-ci reste donc fixe tandis que l'autre est mobile, ce qui donne un moyen de les distinguer.

Incidence oblique. Fig. 512.

1889. Examinons maintenant la marche du rayon extraordinaire quand l'incidence est oblique. Nous distinguerons deux cas : 1° *Incidence dans la section principale;* alors le rayon extraordinaire reste dans le plan d'incidence, de sorte qu'il suit la première loi de la réfraction (1489); mais il ne suit pas la loi de Descartes. Si l'angle d'incidence S I N est de 9° 10' du côté de l'angle solide obtus A de la première face, le rayon réfracté I E se confond avec la normale; les rayons incidents compris dans cet angle S I N se réfractent en *s'écartant* de la normale, comme si l'axe A A' exerçait une répulsion, de sorte que l'écart a lieu dans une direction tout-à-fait insolite. Si l'angle d'incidence S' I N est de

16° 45′ de l'autre côté, le rayon I E′ pénètre sans se dévier ; dans l'angle S′ I N la réfraction extraordinaire se fait comme si la lumière pénétrait dans un milieu moins réfringent que l'air. Le rayon extraordinaire toujours rejeté vers le petit angle solide B′ de la deuxième face se trouve plus ou moins réfracté que le rayon ordinaire, suivant que l'incidence a lieu dans l'angle S I A ou dans l'angle S′ I B. 2° *Incidence hors de la section principale.* Dans ce cas le rayon extraordinaire ne reste plus dans le plan d'incidence, de sorte qu'il ne suit plus ni l'une ni l'autre des deux lois de la réfraction.

Marche de la lumière perpendiculairement à l'axe.

1890. En sciant un rhomboïde, suivant une section principale, on a une face parallèle à l'axe; un rayon qui tombe perpendiculairement sur cette face pénètre sans se dévier, et sans même se diviser, du moins en apparence ; en réalité les rayons ordinaire et extraordinaire se superposent avec des vitesses inégales, et ils se séparent en sortant, pourvu que la face de sortie ne soit point parallèle à la face d'entrée. Supposons qu'on ait ainsi taillé un prisme dont l'arête A A′ soit parallèle à l'axe; on reconnaîtra que dans un plan perpendiculaire aux arêtes, c'est-à-dire quand la lumière marche perpendiculairement à l'axe, les deux rayons suivant les lois de la réfraction simple, l'indice est 1,654 pour le rayon ordinaire, et 1,483 pour le rayon extraordinaire ; d'où il suit que le spath est négatif (1885). On conçoit que les deux rayons doivent se séparer en entrant dans le cristal lorsque la lumière, toujours perpendiculaire à l'axe, arrive obliquement sur la face du prisme.

Fig. 513.

— parallèlement à l'axe.

1891. Si on abat un des angles solides obtus du rhomboïde par une coupe *a b c* perpendiculaire à l'axe A A′, on reconnaît qu'un rayon incident S I parallèle à l'axe pénètre sans se dévier et sans se diviser; de plus, il ne se divise pas en sortant, quelle que soit l'inclinaison de la face de sortie. Ainsi, la lumière n'éprouve pas de double réfraction quand elle marche dans le cristal parallèlement à son axe. Si le rayon émergent R′ I′ rebroussait chemin, il n'éprouverait pas non plus de double réfraction. Il est clair que dans ces cas l'indice de réfraction est celui du rayon ordinaire.

Fig. 514.

Lame perpendiculaire à l'axe.

1892. En abattant aussi l'angle opposé A′ par une coupe *a′ b′ c′* parallèle à la 1re, on a ce qu'on appelle une lame perpendiculaire à l'axe. A travers une telle lame, il est facile de

Fig. 514.

vérifier que les images ne sont pas doublées, pourvu qu'on regarde bien perpendiculairement, car pour des incidences obliques la double réfraction commence à se manifester.

1893. Huygens a parfaitement expliqué comment se fait la vision à travers un rhomboïde de spath d'Islande; il a rendu compte des singularités que présente alors la disposition des deux images. Vision à travers le spath d'Islande.

Soit L le point rayonnant, S l'œil que nous supposerons dans le plan de la section principale A B A' B'; il y a d'abord un rayon ordinaire L I O S qui parvient à l'œil à travers le rhomboïde comme à travers tout corps diaphane à faces parallèles. A son entrée en I par la première face, il produit un rayon extraordinaire I E E', mais celui-ci ne peut pas parvenir à l'œil. A plus forte raison en serait-il de même, tout autre rayon extraordinaire provenant de rayons incidents qui s'approcheraient davantage de l'angle obtus A'. L'image extraordinaire sera donc donnée par des rayons incidents qui s'écarteront de L I dans le sens contraire, c'est-à-dire en se rapprochant de l'angle B. Parmi ceux-ci, il s'en trouvera un, tel que L *i*, dont le faisceau ordinaire *i o o'* ne parviendra pas à l'œil, mais dont le faisceau extraordinaire *ie*S pourra y parvenir; de sorte que l'œil recevra deux images, l'une ordinaire suivant S O, l'autre extraordinaire suivant S *e*; ainsi l'ordinaire paraîtra toujours plus voisine de l'angle solide obtus de la face la plus proche de l'œil. Il résulte de cette explication que, les rayons ordinaires et extraordinaires se croisent dans le rhomboïde; on peut d'ailleurs s'en assurer directement en faisant passer lentement une carte contre la face A' B', située du côté du point rayonnant; quand elle est parvenue en I, elle intercepte le rayon L I qui donne l'image ordinaire, on voit donc alors disparaître cette image, quoique d'après sa position et le mouvement de la carte elle semble ne devoir disparaître qu'après l'autre. Afin que cette antériorité soit bien marquée, il est bon de placer l'œil tout près du rhomboïde, ce qui agrandit l'angle en S. Il faut d'ailleurs regarder un objet d'un petit diamètre, comme un trou percé dans une carte opposée au jour, ou bien un point noir sur du papier. En tout cas, on doit s'en éloigner à quelque distance; car plus le point rayonnant est Fig. 515.

près du rhomboïde ; plus le point K où les rayons se croisent s'approche aussi de la première surface A′ B′.

Vision dans le spath même.

1894. Considérons encore le cas où le point rayonnant est en contact avec le rhomboïde ou dans son intérieur. Soit L ce point. Pour un œil placé à peu près perpendiculairement au-dessus, l'image ordinaire sera en O (1476), toujours plus près de l'angle solide obtus A de la face supérieure. Quant à l'image extraordinaire, on peut la construire par analogie, en menant d'abord le rayon L S′ qui passe sans se dévier (1889) ; les rayons voisins divergent à gauche et à droite en sens inverse ; et comme la réfraction est moindre pour les rayons extraordinaires, c'est d'un point E, situé au-dessous de O que les rayons sembleront provenir. Ainsi l'image extraordinaire paraîtra un peu moins relevée que l'image ordinaire, et d'ailleurs toujours plus éloignée que celle-ci du petit angle solide B′ de la deuxième face. Pour distinguer aisément l'image extraordinaire, on n'a qu'à poser le rhomboïde sur une ligne un peu longue tracée sur du papier ; en regardant bien perpendiculairement on est sûr que l'image ordinaire est celle qui forme le prolongement de la droite, tandis que l'extraordinaire reste sans continuation. C'est quand la droite est perpendiculaire à la section principale que l'écart est le plus grand ; quand elle est parallèle les deux images coïncident ; seulement on reconnaît que les extrémités se dépassent.

Fig. 516.

Double réfraction dans le cristal de roche.

Fig. 517.

1895. Comme second exemple pour l'étude de la double réfraction, nous prendrons le quartz, ou cristal de roche, qui est de la silice absolument pure. La forme ordinaire est celle d'un prisme à six pans, terminé par des pyramides hexaèdres. L'axe du cristal est la droite A A′ qui joint les sommets des pyramides ; cet axe est parallèle aux arêtes du prisme. Les principaux angles sont : entre deux faces du prisme 120° — entre une face du prisme et une face de la pyramide 141° 30′ — entre deux faces de la pyramide 103°.

La double réfraction ne se voit pas quand on regarde perpendiculairement à travers deux faces parallèles du cristal, puisque alors la lumière arrive perpendiculairement sur une face parallèle à l'axe ; mais la double réfraction peut se voir, même pour l'incidence perpendiculaire, à travers les faces E et F qui sont parallèles entre elles et inclinées de 38° 30′ relativement à l'axe. D'ailleurs en taillant un prisme

d'un angle assez petit pour qu'il n'y ait pas trop de coloration, il est toujours possible de mettre la double réfraction en évidence. Avec un prisme dont les arêtes sont parallèles à l'axe on trouve 1,548 et 1,558 pour les indices du réfracteur ordinaire et extraordinaire; celui-ci comme on voit, est le plus grand; ainsi le cristal de roche est positif (1885).

1896. Par une exception bien remarquable, le cristal de roche jouit de la double réfraction suivant son axe. Il est à noter que le rayon le plus réfrangible dans certaines variétés est le moins réfrangible dans d'autres; on trouve aussi quelques échantillons où la double réfraction manque. Comme d'ailleurs la différence entre les deux indices ne porte que sur les cent millièmes, il faut des dispositions particulières pour bien séparer les rayons. Fresnel s'est servi pour cela d'un prisme A B C, de 152°, compris entre deux autres D A B, B C E d'angles moitié moindres et provenant de la variété inverse de cristal de roche. Tous ces prismes doivent être taillés et ajustés de manière que la marche des rayons s'y fasse à très peu près suivant l'axe. La lumière qui entre par la première face A D se divise en deux rayons; pour l'un, le prisme moyen est un milieu plus réfrangible entre deux milieux moins réfrangibles; ce rayon doit donc le rapprocher de la base; c'est le contraire pour l'autre rayon; d'où il suit que l'écart est double. En même temps la dispersion étrangère à la double réfraction est supprimée; car il est facile de voir que le prisme serait achromatique (1693) si la double réfraction s'exerçait avec la même énergie sur les rayons des diverses couleurs; on peut donc affirmer que la coloration qui subsiste est due à l'inégalité de la double réfraction qui est beaucoup plus forte pour les rayons violets que pour les rayons rouges, ainsi que l'ordre des couleurs le fait reconnaître. Double réfraction suivant l'axe. Fig. 518.

1897. Fresnel s'est assuré que les deux rayons provenant de la double réfraction du cristal de roche suivant son axe étaient polarisés circulairement (1861) et en sens inverse, car les plans de polarisation des rayons restaurés se trouvaient à 45° du plan de réflexion, l'un d'un côté, l'autre de l'autre. Quand les rayons sont un peu inclinés sur l'axe, la polarisation devient elliptique; et en augmentant l'inclinaison l'on passe graduellement à la polarisation rectiligne. Polarisation circulaire et elliptique dans le quartz

Prisme biréfringent de Rochon.

1898. On fait soit avec le quartz, soit avec le spath des prismes composés, dits *biréfringents*, qui sont d'un emploi très fréquent en optique; ceux de quartz sont préférables à cause de la dureté de la matière. L'appareil se compose de

Fig. 519.

deux prismes A B C, B C D collés ensemble et taillés de manière à former une plaque épaisse dont les faces A B et C D sont parallèles. Dans la coupe la plus simple, le premier prisme a la face A B perpendiculaire à l'axe, tandis que, dans le second, l'axe est parallèle aux arêtes. Un rayon normal S I pénètre dans le premier sans se dévier; à la jonction des faces en K, il se divise en deux rayons polarisés à angle droit. La double réfraction suivant l'axe ne joue ici aucun rôle; le rayon ordinaire K L M continue sa route sans déviation, tandis que le rayon extraordinaire K E se réfracte, puisque pour lui la vitesse devient différente. Le quartz étant positif (1895), sa vitesse extraordinaire est moindre (1502); ainsi le rayon se rapproche de la normale; on aurait ici $\frac{1558}{1548}$ pour l'indice de réfraction (1503); en sortant, le rayon se réfracte encore de manière à se rapprocher de la base du prisme, de sorte qu'en définitive l'angle des deux rayons ou l'angle de *bifurcation* est MLN. On conçoit qu'un œil placé en N doit voir deux images, l'une ordinaire dans la direction N O, l'autre extraordinaire dans la direction N E. L'angle O N E entre les deux images est évidemment égal à l'angle de bifurcation; du moins s'il s'agit d'un objet assez éloigné pour que les rayons qu'il envoie puissent être considérés comme parallèles.

L'image extraordinaire se reconnait à différents caractères: 1° elle n'est pas dans la direction de l'objet, de sorte qu'elle décrit un cercle autour de l'image ordinaire pendant qu'on fait tourner le prisme; 2° elle est un peu irisée quand l'angle de bifurcation est grand, car pour elle le prisme n'est pas achromatique; 3° c'est elle qui subsiste quand on regarde à travers une tourmaline dont l'axe est parallèle à la droite qui joint les deux images (1884). Il est à noter que les phénomènes restent les mêmes quand on tourne vers l'objet la face qui était vers l'œil. Nous ne donnons les caractères précédents que pour la coupe que nous avons spécifiée; ils ne s'appliqueraient pas à une autre coupe que nous ferons connaître plus loin.

Si on n'employait qu'un seul prisme, tel que B C D, les images seraient toutes deux déviées du même côté, et toutes deux fortement irisées. Comme l'angle A B C est fort grand, la lumière éprouverait une réflexion totale (1505) s'il existait de l'air entre les deux prismes; c'est pourquoi on les unit avec du mastic en larmes ou de la térébenthine.

1899. Le calcul montre que quand l'angle réfringent B C D est de 60°, l'angle de bifurcation O N E n'est pas encore de 1°; cependant il peut aller jusqu'à 10° quand on augmente l'angle réfringent, et avec le spath il peut dépasser 40°; pour les usages que nous ferons tout-à-l'heure connaître il est tout au plus de 1°. On le mesure au moyen d'une mire A B dont on s'éloigne jusqu'à ce que les images se touchent sans se superposer. Soit alors N la position de l'œil; on est sûr que le rayon extraordinaire provenant de A suit la même direction que s'il provenait de A', et on a $\frac{AB}{AN}$ pour la tangente de l'angle de bifurcation; si, par exemple, $AB = 0^m,175$ et si $AC = 10^m$, l'angle de bifurcation est de 1°. Cet angle varie, mais très peu, quand l'incidence s'écarte légèrement de la perpendiculaire. L'observation du contact est plus sûre en regardant avec une petite lunette placée contre le prisme; A N est alors la distance à l'objectif.

Mesure de l'angle de bifurcation.

Fig. 520.

1900. M. Arago se sert de prisme biréfringent pour mesurer le grossissement dans les lunettes et dans les télescopes (1558); le prisme étant appliqué sur l'oculaire, on s'approche ou on s'éloigne d'une mire jusqu'à ce que les deux images soient en contact, on peut alors affirmer que l'angle soutenu par une des images est de 1°, si tel est l'angle de bifurcation. Mais la grandeur de la mire et sa distance étant connues, il est aisé de calculer l'angle qu'elle soutend à l'œil nu; si cet angle est d'une minute, il est clair que la lunette grossit soixante fois. En général, soient a l'angle soutendu à l'œil nu par la mire, A l'angle de bifurcation, G le grossissement, on a lors du contact des images $\frac{A}{a} = G$. La mire se compose ordinairement de plusieurs disques noirs sur un fond blanc; les diamètres décroissent insensiblement, de sorte que sans se déplacer on peut trouver un disque dont les images se touchent.

Mesure du grossissement dans les lunettes.

— dans les microscopes. Fig. 521.

1901. Le procédé s'applique aussi au microscope. Supposons que les deux images du micromètre R R se débordent de quatre parties (1549), c'est que quatre centièmes de millimètres soutendent 1° dans le microscope; à l'œil nu ils soutendraient un angle dont la tangente est $\frac{4}{16000}$ puisque la distance de la vue distincte est de 160 millimètres pour les petits objets; le grossissement est ici le rapport des tangentes; c'est donc 0,0175 : $\frac{1}{4000}$ ou 70.

Micromètre biréfringent de M. Arago.

1902. Nous savons qu'on peut faire varier le grossissement dans une lunette en faisant varier la distance des verres qui composent l'oculaire; supposons qu'on ait mesuré les divers grossissements et qu'on les ait inscrits sur une échelle latérale; si on regarde dans une pareille lunette avec un prisme biréfringent, on aura deux images qu'on pourra mettre en contact sans se déplacer. Soit G le grossissement qui donne le contact; pour avoir l'angle soutendu par l'objet, il n'y a qu'à tirer a de l'équation $\frac{A}{a} = G$, A étant toujours l'angle de bifurcation du prisme (1900).

Lunette de Rochon. Fig. 522.

Dans la lunette micrométrique imaginée par Rochon il y a un prisme biréfringent P mobile entre l'objectif O et le foyer F; on ne voit qu'une image quand le prisme est au foyer; mais à mesure qu'il s'éloigne ou se rapproche de l'objectif, les deux images se séparent, et il arrive un moment où elles ne font plus que se toucher. Un index mobile avec le prisme fait alors connaître, sur une division gravée le long du tube, quel est l'angle soutendu par l'objet. Pour expliquer comment cette division se construit, remarquons d'abord que l'index donne le zéro quand le prisme est dans la position où les images sont superposées, car alors *le contact a lieu pour les deux images d'un point* qui est un objet d'un angle nul; dans cette position le foyer se trouve à l'intérieur du prisme, au sommet de l'angle de bifurcation. Maintenant faisons marcher le prisme jusqu'à ce que nous obtenions le contact des images; soient $PF = p$ son déplacement, $FPF' = A$ son angle de bifurcation, $OF = F$ le foyer de l'objectif, $FOF' = a$ l'angle soutendu par l'objet; on a $FF' = p$ tg. $A = F$ tg. a, ou $pA = Fa$, à cause de la petitesse des angles. Or F et A étant à peu près invariables, l'équation montre que *le déplacement du prisme est propor-*

tionnel à l'angle de l'objet. Si donc on opère sur une mire soutendant, par exemple, un angle de 20′, on marquera 20′ à l'endroit où se trouve l'index ; on divisera en vingt parties égales l'intervalle entre ce point et le zéro ; puis on portera ces parties au-delà suivant la longueur du tube. A côté de l'échelle des minutes la lunette porte l'échelle des cotangentes ; par exemple, à côté de 20′ on lit 172 ; cela signifie que la distance de l'objet est égale à 172 fois la grandeur ; en effet l'équation tg. $a = \frac{d}{D}$ (1576) donne $D = d$ cotg. a.

La lunette micrométrique de Rochon ne s'emploie que pour les objets terrestres qui ne soutendent pas plus de 20 ou 30′ ; pour les astres, l'image extrordinaire est trop fortement irisée, du moins quand le diamètre est grand ; aussi pour mesurer le diamètre du soleil ou de la lune le micromètre de M. Arago est préférable ; le défaut d'achromatisme y est insensible.

1904. On se sert quelquefois du prisme biréfringent pour se procurer de la lumière polarisée ; il faut alors arrêter un des rayons, et voici un moyen très ingénieux d'y parvenir. On prend un rhomboïde de spath d'Islande ayant à peu près 27 millimètres de longueur sur 9 de largeur et d'épaisseur ; on le coupe suivant les diagonales parallèles de deux des longues faces, et les prismes ainsi obtenus sont réunis par du *baume de Canada* dans la position qu'ils avaient d'abord. L'indice du baume, qui est 1,549, se trouve intermédiaire entre les indices ordinaire et extraordinaire du spath ; il en résulte que des deux rayons qui se propagent suivant la longueur de cet appareil, un seul peut traverser, c'est le rayon extraordinaire ; pour le rayon ordinaire, il y a réflexion totale. Le prisme de Nicol remplace très bien la tourmaline, comme polariscope (1830). Prisme de Nicol.

§ III. *Cristaux à deux axes.*

1905. Dans les cristaux à deux axes on appelle *ligne moyenne* ou *intermédiaire* la bissectrice I I′ des angles aigus formés par les axes optiques A′, B B′ ; la bissectrice S S′ des angles obtus est la *ligne supplémentaire*. On nomme *section moyenne* ou *intermédiaire* le plan passant par la ligne moyenne perpendiculairement au plan des axes ; *section* Définitions. Fig. 523.



supplémentaire un plan qui est aussi perpendiculaire au plan des axes et qui passe par la ligne supplémentaire. Ces deux plans et celui qui contient les axes forment les trois *sections principales*. La ligne moyenne, la ligne supplémentaire et la perpendiculaire au plan des axes optiques sont les 3 *axes de double réfraction*, la ligne moyenne est l'*axe principal*; ces trois lignes portent aussi le nom d'*axes de cristallisation*, d'*axes d'élasticité*.

Exemples. 1906. Prenons maintenant quelques exemples : 1° la *chaux sulfatée ;* sa forme primitive est un prisme droit, ayant pour

Fig. 524. base un parallélogramme dont l'angle aigu est de 66° 52'. Ce prisme se divise facilement en feuillets parallèles à la base. Le plan des axes est aussi parallèle à la base, leur angle *a c b* est de 60°. Si on prend les côtés du parallélogramme dans le rapport de 36 à 13, la grande diagonale PQ forme précisément la ligne moyenne ; d'où il suit que cette ligne fait un angle de 16° 13' avec le grand côté ; d'après ces données on peut retrouver la ligne moyenne dans une lame quelconque, puisque la lame se brise naturellement suivant les côtés du parallélogramme ; il est aisé ensuite de mener les axes *a a'*, *b b'*.

Fig. 525. 2° La *mica de Sibérie ;* sa forme primitive est un prisme rhomboïdal PR qui se divise, comme la chaux sulfatée, en feuillets parallèles à la base ; la perpendiculaire aux feuillets ou l'axe du prisme est la ligne intermédiaire ; l'angle des axes est de 40° 41'.

3° *L'arragonite* et la *topaze incolore* ont aussi un prisme rhomboïdal droit pour forme primitive ; les angles des axes sont de 19° 52' et de 64° 14'. Ces cristaux, à cause de leur épaisseur et de leur belle eau, sont très précieux pour l'étude de la double réfraction.

Voici encore quelques cristaux qu'on rencontre fréquemment ; l'angle des axes n'est donné que d'une manière approximative :

Nitrate de potasse. . .	5°	Phosphate de soude. .	55°
Borax.	28	Sulfate de potasse. . .	67
Sulfate de magnésie. .	37	Carbonate de soude. .	70
Sulfate de baryte. . .	37	Acide tartrique. . . .	79
Sulfate de zinc. . . .	44	Chlorate de potasse. . .	82
Sucre.	50	Sulfate de fer.	90

1907. Nous verrons plus loin comment on peut déterminer la position des axes; mais dès à présent nous devons observer qu'ils ne sont pas rigoureusement les mêmes pour les rayons de couleur différente; dans certains cristaux leur écart est plus grand pour les rayons les plus réfrangibles, c'est le contraire dans d'autres; presque toujours les axes des différentes couleurs sont dans un même plan, mais il y a des exceptions, notamment pour le borax; la ligne moyenne elle-même peut varier, c'est ce qui a lieu, par exemple, dans le sulfate de chaux. On voit d'après cela qu'il n'y a pas une dépendance rigoureuse entre la forme cristalline et la position des axes optiques, puisque si la dépendance était admise pour une couleur, elle serait en défaut pour une autre. Nous ferons en général abstraction de la variation des axes, qui est ordinairement fort petite. **Variation des axes optiques.**

1908. Les cristaux à un axe se comportent comme des milieux isophanes, comme du verre par exemple, par rapport à l'un des rayons (1884); il n'en est pas de même des cristaux à deux axes : excepté dans quelques directions particulières, les rayons sortent tous deux du plan d'incidence, et il n'y a plus d'indice de réfraction constant ni pour l'un ni pour l'autre. Si on taille dans une topaze plusieurs morceaux en sens divers, et qu'après les avoir accolés on les travaille ensemble pour en faire un prisme de même angle, on reconnaît que les deux images d'une ligne droite parallèle à l'arête du prisme sont des lignes brisées, ce qui prouve bien qu'il n'y a plus de rayon ordinaire. **Il n'y a plus de rayon ordinaire.**

1909. Les deux rayons réfractés restent dans le plan d'incidence quand celui-ci coïncide avec une des trois sections principales (1905), et en outre l'un des rayons suit alors la loi de Descartes; mais en général il y a un indice différent pour chacune des trois sections. La lumière se bifurque toujours dans ces sections, même quand elle tombe perpendiculairement, excepté quand elle arrive suivant un des axes de cristallisation; dans ce cas, les rayons ordinaires et extraordinaires restent superposés, et ne se séparent que si la face de sortie est oblique. **Marche de la lumière dans les sections principales.**

1910. Supposons qu'on ait taillé deux faces perpendiculaires à un axe optique; si on fait tombér un rayon S I perpendiculairement sur une des faces, on aura deux rayons **— suivent les axes optiques.** Fig. 526.

réfractés, l'un ordinaire IO qui marchera suivant l'axe, l'autre extraordinaire IE qui s'en écartera. Celui-ci sortira parallèlement au rayon incident; mais l'autre émergera en formant un cône creux dont BOC est l'intersection par le plan de la figure.

Axes de réfraction conique. Fig. 527.

1911. Il y a dans les cristaux à deux axes deux directions remarquables, appelées *axes de réfraction conique*. Supposons qu'on ait taillé deux faces perpendiculairement à ces directions; si on fait tomber un rayon SI perpendiculairement sur une des faces, ce rayon se réfractera en un cône creux AIB dont l'axe sera le prolongement du rayon incident, et à l'émergence on aura un cylindre creux ABCD. La cavité de ce cylindre lumineux n'est bien sensible que quand le cristal est un peu épais; aussi a-t-on cru long-temps que la lumière était transmise sans se diviser dans ces directions, que l'on considérait, d'après cela, comme les véritables axes optiques. D'ailleurs quand, au lieu d'un seul rayon, l'on considère un large faisceau, rien ne fait soupçonner la réfraction conique; la lumière transmise conserve la direction de la lumière incidente, il n'y a pas déviation angulaire; et pour les objets qu'on regarde à travers, la lame cristallisée paraît se comporter comme une lame de verre. Il est à noter que dans tous les cristaux connus, les axes de réfraction conique se confondent presque avec les axes optiques, aussi ne les distinguerons-nous pas en général; nous dirons seulement ici que quand on parle de l'angle des axes, des anneaux colorés autour des axes, etc., il s'agit plutôt des axes de réfraction coniques que des axes optiques.

Sens de la polarisation.

1912. Dans les trois sections principales, le rayon ordinaire est polarisé parallèlement, et le rayon extraordinaire perpendiculairement au plan de la section. Dans le cône et le cylindre obtenus suivant les axes optiques et de réfraction conique, les rayons sont tous polarisés dans des plans différents; l'angle entre les plans de polarisation de chaque couple de rayons est la moitié de l'angle compris entre les plans contenant les rayons et passant par l'axe; ainsi, dans la section ABDC du cône ou du cylindre, les rayons diamétralement opposés, comme A et C, B et D, sont polarisés à angle droit. Quant aux deux rayons donnés en général par la double réfraction, on peut déterminer approximativement le sens de

Fig. 528.

leur polarisation par cette règle : si l'on mène un plan par l'un d'eux et par chacun des axes optiques, le plan de polarisation d'un des rayons divisera l'angle dièdre en deux parties égales, l'autre sera perpendiculaire à ce plan intermédiaire.

Signe de cristaux à 2 axes.

1913. Par analogie pour les cristaux à un axe, les cristaux à deux axes sont divisés en positifs et en négatifs (1885); pour déterminer le signe d'un cristal, on taille un prisme dont l'arête soit parallèle à la ligne moyenne; si l'image polarisée perpendiculairement à l'arête est la plus déviée, le cristal est dit positif; le sulfate de chaux et la topaze incolore sont positifs: le mica de Sibérie et l'arragonite sont négatifs. Il est clair que dans les cristaux positifs, des deux rayons qui marchent perpendiculairement à la ligne moyenne, c'est l'ordinaire qui a la moindre vitesse.

§ IV. *Théorie de la double réfraction.*

Structure des milieux biréfringents.

1914. Pour remonter à la cause de la double réfraction il est nécessaire de connaître la structure des milieux biréfringents; or, nous allons voir que ce qui caractérise ces milieux, c'est *l'inégal rapprochement des molécules dans les différentes directions.*

Double réfraction artificielle.

1915. Fresnel a démontré qu'il suffisait de comprimer le verre pour lui donner la double réfraction; un prisme comprimé sur ces bases prend les mêmes propriétés qu'un prisme de spath qui a ses arêtes parallèles à l'axe; il donne deux images polarisées à angle droit; la plus déviée a son plan de polarisation perpendiculaire aux arêtes. Comme la double réfraction est encore très faible, même quand le verre est près d'éclater, on augmente la déviation en multipliant les prismes, on achromatise en même temps les images. L'appareil se compose de sept prismes de 90° A, B, C, D, E, F, G, et de deux prismes H, I de 45°; l'ensemble forme un parallélépipède qu'on met dans une presse à main; les prismes A, B, C, D, qui sont un peu plus épais, supportent seuls la pression et deviennent biréfringents, les autres ne servent qu'à l'achromatisme; tous ces prismes sont collés avec du mastic (1501); s'il restait de l'air entre eux, la lumière ne passerait pas (1505). En regardant, suivant la direc- Fig. 529.

tion SI, un objet très étroit, par exemple un paratonnerre éloigné, on le voit manifestement double et l'écart augmente avec la compression ; d'ailleurs la polarisation des images ne laisse aucun doute sur la double réfraction.

Avec un appareil du même genre, M. Guérard a constaté la double réfraction du verre trempé ; il l'a trouvée aussi négative. Au moyen de la lumière polarisée nous verrons que la double réfraction se développe toutes les fois que, par une action mécanique, les molécules d'un corps transparent se trouvent plus rapprochées dans certaines directions que dans d'autres (1964).

Action de la chaleur sur les cristaux.

1916. D'après la forme des cristaux doués de la double réfraction (1880), l'on peut déjà penser que les molécules sont plus rapprochées dans certaines directions que dans d'autres ; et la manière dont se fait la dilatation par la chaleur (895) confirme cette manière de voir. En général, dans les cristaux à un axe, les dilatations sont inégales suivant l'axe et perpendiculairement à l'axe ; dans les cristaux à deux axes, l'inégalité s'observe dans les trois dimensions, de manière que les petits axes se dilatent à proportion plus que les grands ; ainsi on peut dire que dans tous ces cas l'action de la chaleur tend à égaliser les distances des molécules. Or, Fresnel a constaté que la double réfraction diminuait alors ; on ne peut donc pas se refuser à admettre que la double réfraction tient à l'inégal rapprochement des molécules dans les différentes directions. M. Brewster a découvert que le sulfate de chaux subit une altération si grande par l'élévation de la température, que les axes finissent par se réunir, et que si la chaleur est poussée plus loin, ils se séparent de nouveau, mais dans un plan perpendiculaire au plan primitif.

Structure des cristaux biréfringents.

1917. Dans les cristaux, l'inégale distance des molécules est soumise à une grande régularité ; pour nous en faire une idée dans les cristaux à un axe, nous n'avons qu'à imaginer qu'un cube de verre soit comprimé bien également sur deux faces opposées (1915) ; la direction de la compression sera l'axe optique, les molécules seront également espacées suivant cet axe et perpendiculairement à sa direction ; mais leur distance sera différente dans les deux cas. Ici où les molécules sont plus rapprochées suivant l'axe, nous aurons

un cristal négatif ; une dilatation dans un sens ou deux compressions égales dans deux sens rectangulaires donneraient un cristal positif, et il est probable qu'on aurait la double l'axe réfraction circulaire si les pressions perpendiculaires à produisaient une certaine torsion.

Pour avoir la structure des cristaux à deux axes, il faut imaginer que le cube soit comprimé inégalement dans deux directions différentes. Il s'ensuit que dans les cristaux à deux axes la distance des molécules est constante dans trois directions rectangulaires et variable d'une direction à l'autre. Ces trois directions ont été appelées *axes d'élasticité*, parce que ce sont les seules où il y ait coïncidence entre la force élastique et le déplacement qui la met en jeu ; on les distingue en axes de plus grande, de plus petite et de moyenne élasticité : les deux premiers sont précisément les lignes intermédiaire et supplémentaire (1905) ; l'axe de moyenne élasticité est par conséquent perpendiculaire au plan des axes optiques.

Comment ils produisent la double réfraction et la polarisation.

1918. Maintenant pour concevoir comment la double réfraction se produit, il faut observer que l'inégal rapprochement des molécules pondérables entraîne l'inégal rapprochement des molécules d'éther : celles-ci dès lors ne vibrent plus avec la même facilité dans toutes les directions ; par exemple, dans les cristaux à un axe les vibrations rectilignes ne peuvent se faire que perpendiculairement à l'axe ou dans des plans qui lui sont parallèles. Un mouvement qui ne satisfait pas à ces conditions se trouve décomposé en deux mouvements rectangulaires qui y satisfont ; ces deux mouvements se propagent en général avec des vitesses différentes, ce qui entraîne une réfraction inégale. On voit que la double réfraction est intimement liée à la polarisation.

Quant à la polarisation circulaire produite par le cristal de roche (1897), on peut la concevoir en se rappelant qu'un rayon polarisé en ligne droite équivaut à deux rayons polarisés circulairement en sens inverse (1870), et que la lumière naturelle se compose d'une suite de rayons polarisés dans tous les azimuts. C'est la distribution particulière de l'éther dans le sens de l'axe, qui détermine la décomposition de chaque rayon et la différence des vitesses des deux rayons

résultants ; la séparation dépend de cette différence de vitesse et de l'obliquité de l'incidence.

Forme de l'onde dans les cristaux à un axe. Fig. 533.

1919. Pour nous faire une idée de la propagation de la lumière dans les cristaux à un axe, supposons que O soit un point lumineux dans le spath d'Islande, par exemple. Menons l'axe OX qui passe par ce point O et deux droites OY, OZ oerpendiculaires entre elles et à l'axe. La lumière qui suit la marche ordinaire formera une onde sphérique que nous pouvons représenter par ses intersections AB, AC, BC avec les plans XY, XZ et ZY. Mais on a en outre l'onde extraordinaire AZY qui a la forme d'un ellipsoïde de révolution dont l'axe est l'axe même du cristal, de sorte que l'intersection ZY est un cercle, tandis que les autres sont des ellipses. Ici l'ellipsoïde est aplati, l'onde extraordinaire va plus vite, elle contient l'onde ordinaire ; ce serait le contraire dans le cristal de roche ; les rayons OC, OZ, qui représentent les vitesses ordinaire et extraordinaire dans un plan perpendiculaire à l'axe sont en raison inverse des indices de réfraction (1890, 1502). Les vibrations sur l'onde ordinaire sont toujours perpendiculaires à l'axe ; sur l'onde extraordinaire, elles sont toujours dans la section principale (1884) ; on peut donc dire que les premières se font suivant des *parallèles* et les autres suivant des *méridiens* ; quant aux plans de polarisation, ce sont au contraire des méridiens pour l'onde ordinaire et des parallèles pour l'onde extraordinaire.

Construction d'Huygens. Fig. 531.

1920. Huygens, qui a déterminé la forme de l'onde dans les cristaux à un axe, en a déduit une construction qui donne la route des deux rayons réfractés ; nous l'appliquerons au cas de l'incidence perpendiculaire sur une face naturelle d'un rhomboïde. Soit SI le rayon incident ; par le point d'incidence I on mène l'axe IA' et on construit la surface de l'onde ; on mène ensuite deux plans tangents tt, $t't'$ parallèles à la face d'incidence AB ; les points de contact o et e déterminent la route du rayon ordinaire IO et du rayon extraordinaire IE.

Pour se rendre compte de la règle, il faut observer que le rayon incident a toujours une certaine largeur, d'où il suit que la construction de l'onde doit se faire pour un grand nombre de points. Or si on la fait, on voit que le rayon extraordinaire a bien la direction assignée, puisqu'il est le

Fig. 532.

lieu où les éléments des ellipsoïdes se confondent (1800). Quant au rayon ordinaire, la règle est évidente pour lui.

1921. Cette construction montre que la lumière se propage encore en ligne droite dans les milieux biréfringents, même quand l'onde n'est pas sphérique; ainsi on peut affirmer que le mouvement qui est en un point quelconque de la surface de l'onde y est parvenu suivant la droite menée du centre d'ébranlement à ce point; cette droite est donc réellement le rayon lumineux (1794) qui, dans le cristal, comme on le voit, peut très bien ne pas être perpendiculaire à l'onde. Puisque le rayon peut être oblique à l'onde, il est clair qu'on ne doit pas confondre la vitesse de la lumière suivant le rayon, avec la vitesse de propagation de l'onde; ici la vitesse de propagation de l'onde se mesurerait suivant une perpendiculaire à la surface AB. Remarques.

Une conséquence encore de l'obliquité du rayon par rapport à l'onde, c'est que les vibrations de l'éther qui se font toujours, au moins à très peu près, dans la surface même de l'onde, peuvent très bien ne pas être perpendiculaires au rayon.

1921. Dans les cristaux à deux axes, l'onde se compose de deux surfaces renfermées l'une dans l'autre et ayant quatre points communs par lesquels passent les axes optiques. Si on mène trois plans rectangulaires par les trois axes d'élasticité OX, OY, OZ (1917), on a pour intersection sur chaque plan un cercle et une ellipse, lesquels diffèrent d'un plan à l'autre. AA, BB, CC, sont des quarts de cercle; AC, CB, BA, sont des quarts d'ellipse; M est un des points communs aux deux surfaces; OM est un axe optique; si on mène une tangente commune au cercle et à l'ellipse dans le plan XY des axes, la perpendiculaire abaissée du point O sur cette tangente sera un axe de réfraction conique (1911). OX et OY sont les lignes moyenne et supplémentaire, de sorte que les plans coupants forment précisément les sections principales (1905). Forme de l'onde dans les cristaux à 2 axes. Fig. 533.

Si on veut avoir la direction des vibrations pour un rayon quelconque, il faut mener un plan tangent à l'onde dans le point où le rayon aboutit; la projection du rayon sur le plan tangent donne la direction cherchée. En appliquant cette règle aux rayons menés dans les sections principales, on voit

que pour les ellipses les vibrations sont parallèles à la section ; pour les cercles il y a incertitude, mais la figure montre qu'elles sont perpendiculaires. Suivant un axe d'élasticité il ne peut se propager que des vibrations parallèles aux deux autres axes, et par conséquent perpendiculaires entre elles. Le rayon qui suit la loi de Descartes (1909) est évidemment celui qui aboutit à la section circulaire ; le rapport des vitesses OA, OB, OC est donné par la réciproque des indices ; l'axe de plus grande élasticité est perpendiculaire au plan dans lequel a lieu la plus grande élasticité, et ainsi des autres.

Réfraction conique.

1922. La construction d'Huygens s'applique aux cristaux à deux axes ; elle va nous expliquer la réfraction conique (1911). Il existe un enfoncement à la surface de l'onde au point multiple M, qu'on désigne même à cause de cela sous le nom d'*ombilic*. Le calcul montre que le plan qui passe par la tangente commune au cercle et à l'ellipse, et qui est perpendiculaire au plan des axes optiques, touche la surface de l'onde à l'entrée de l'enfoncement ombilical, non pas en deux points seulement, mais suivant une courbe fermée à très peu près circulaire. D'après cela, si un rayon tombe perpendiculairement sur une face parallèle à ce plan tangent, d'après la règle d'Huygens, il faudra construire l'onde en prenant le point d'incidence pour centre, puis mener des plans tangents aux deux nappes de la surface ; les rayons réfractés seront les droites menées du point d'incidence aux points de contact ; or, il est évident qu'ici les droites formeront une surface conique. A l'émergence, les rayons redeviennent parallèles à la direction d'incidence, de sorte qu'on doit avoir un cylindre.

Dispersion de la lumière qui a parcouru l'axe.

1923. Quand la surface d'émergence est oblique à la surface de l'onde, cela n'empêche pas la lumière de sortir ; mais alors le rayon qui sort n'est plus perpendiculaire à la surface d'émergence ; il se réfracte dans une direction qui varie suivant l'angle compris entre la surface de l'onde et la surface d'émergence. Au point ombilical, il y a une infinité de plans tangents à l'onde, et par conséquent une infinité de directions suivant lesquelles le rayon peut émerger ; c'est ce qui explique la dispersion de la lumière qui a parcouru l'axe optique (1910).

CHAPITRE X.

ACTION DES MILIEUX BIRÉFRINGENTS SUR LA LUMIÈRE POLARISÉE.

§ 1er. *Double réfraction de la lumière polarisée.*

Procédés pour se procurer de la lumière polarisée.

1924. Pour les expériences qui vont nous occuper, il faut se procurer de la lumière polarisée; on y parvient avec une glace sans tain, ou mieux une pile de glaces, soit par réflexion, soit par réfraction (1829), avec l'analyseur de Delezenne (1830), une tourmaline (1878), le prisme de Nicol (1904), ou un prisme biréfringent ordinaire (1898) dont on arrête un des rayons; ces pièces s'adaptent à l'appareil de polarisation que nous avons décrit (1821). Ordinairement on opère avec la lumière des nuées, mais on peut aussi employer la lumière solaire réfléchie par un héliostat ou simplement par un porte-lumière (1540); on en fait aujourd'hui qui sont disposés exprès, de sorte qu'ils remplacent l'appareil de polarisation.

Appareil de Norremberg. Fig. 534.

Quand on n'a pas besoin de la lumière solaire, on se sert très commodément d'un appareil simple et peu dispendieux, imaginé par M. Norremberg. Une glace nue A B inclinée de 34° par rapport aux montants C D, E F, polarise la lumière du ciel par la réflexion extérieure et intérieure (1826); le faisceau polarisé tombe perpendiculairement sur une glace étamée G H et remonte verticalement en traversant la glace A B, l'anneau I K dont nous verrons bientôt les usages, puis les différents polariscopes, ou analyseurs qu'on met en L; on peut y mettre aussi une glace noire M N qu'on incline sous l'angle de polarisation.

Inégalité des deux rayons réfractés.

1925. Les deux rayons que la lumière naturelle donne par la double réfraction sont toujours égaux en intensité, il n'en est pas de même de la lumière polarisée. Que dans l'appareil de Norremberg on mette en L une carte percée d'un trou d'épingle, et sur le trou un rhomboïde de spath d'Islande, on aura en général deux images d'intensité inégale. Si la section principale est dans le plan de polarisation, l'i-



mage ordinaire sera seule visible ; à mesure qu'on tournera la section principale, l'image extraordinaire prendra plus de vivacité ; les intensités seront égales quand l'angle sera de 45°. Ensuite l'image ordinaire décroîtra ; elle finira par s'éteindre, et toute la lumière sera passée dans l'image extraordinaire au moment où la section principale sera perpendiculaire au plan de polarisation ; les mêmes phénomènes se produiront en sens inverse à chaque quart de révolution. La
Fig. 535. figure 535 donne une idée des variations d'intensité ; P P est le plan de polarisation, les diamètres sont les sections principales, l'image ordinaire reste fixe pendant la rotation du rhomboïde, mais les états successifs pour chaque position de la section principale ont été figurés un peu en dehors du centre de la circonférence que décrit l'image extraordinaire ; les images visibles sont représentées par de petits cercles et les images invisibles par des points. On retrouve ici la loi de
Loi de Malus. Malus (1835) ; soit 1 l'intensité de l'image ordinaire quand la section principale et le plan de polarisation coïncident, l'intensité devient $\cos^2 a$ quand l'angle des plans est a. La même loi s'applique à l'image extraordinaire, en partant d'une position où elle a toute la lumière ; il en résulte que les intensités des deux images pour un azimut a sont $\cos^2 a$ et $\sin^2 a$; la somme est toujours égale à l'unité ; la lumière qui manque dans une image se retrouve dans l'autre.

L'inégale intensité des rayons réfractés suit la même loi dans la section perpendiculaire à l'axe ; on peut s'en assurer avec un prisme biréfringent taillé comme nous l'avons dit (1898). L'expérience se fait alors en ôtant la carte et en mettant sur la glace étamée un papier noir percé d'un petit trou. Tout ce que nous venons de dire s'applique aussi aux sections principales des cristaux à deux axes ; dans les autres sections l'inégalité subsiste encore, mais elle suit des lois différentes ; ainsi, jamais un des rayons n'est complétement éteint. Il est à noter que, dans les sections principales, l'extinction complète d'un des rayons peut avoir lieu sans que l'incidence soit perpendiculaire ; la seule condition, c'est que le faisceau incident soit polarisé parallèlement ou perpendiculairement à la section ; quand cette condition est remplie la lumière ne se divise pas, c'est comme s'il n'y avait pas de double réfraction.

1926. Pour se rendre compte de ces phénomènes, il faut examiner la polarisation de l'onde dans les cristaux à un et à deux axes (1919, 1921). Dans les sections principales les vibrations ne peuvent être que parallèles ou perpendiculaires au plan de la section; si les vibrations incidentes ont l'une ou l'autre de ces directions, elles se propagent sans se diviser; autrement elles se décomposent, suivant la règle du parallélogramme des forces. Soit P Q R S une lame de mica perpendiculaire au rayon incident, P R la section qui passe par le plan des axes, Q S la section moyenne, M N la vibration qui tend à se propager et qui fait avec cette section un angle $SMN = a$; M N se décomposera en $MA = MN \cos a$ et en $MB = MN \sin a$. On voit qu'en faisant varier l'angle a, la lumière se fractionne en telles proportions que l'on veut; seulement si la lame est mince, les deux rayons polarisés à angle droit restent superposés. Explication. Fig. 536.

Comme la lumière naturelle se compose d'une succession infiniment rapide de rayons très courts, qui ne sont pas plutôt polarisés dans une direction que dans une autre, il n'y a pas de raison pour que l'intensité des deux faisceaux réfractés soit inégale; d'ailleurs, on peut décomposer la lumière naturelle en deux faisceaux égaux polarisés à angle droit et indépendants (1847). En considérant chacun de ces faisceaux séparément, on voit par la figure 535 que l'image ordinaire de l'un est précisément l'image extraordinaire de l'autre. Si on superposait les deux images on aurait toujours une même intensité; donc l'image ordinaire formée par les deux rayons doit avoir une intensité constante et égale à celle de l'image extraordinaire. Il en est de même avec la lumière polarisée circulairement qu'on peut aussi décomposer en deux faisceaux égaux et polarisés à angle droit; il est vrai que les faisceaux élémentaires ne sont plus indépendants, mais la différence de phase étant toujours de 1/4 d'ondulation, les intensités s'ajoutent tout simplement (1852).

1927. La double réfraction du rayon polarisé se présente avec des circonstances curieuses dans l'expérience des *rhomboïdes superposés* qui a suggéré à Huygens l'idée de la *polarité* ou de la distinction des côtés dans un rayon lumineux. Supposons qu'on regarde à travers un rhomboïde de spath d'Islande un point noir marqué sur le papier, on en verra Expérience d'Huygens.



Fig. 537. deux comme en A; qu'on superpose maintenant un second rhomboïde d'une égale épaisseur, en le plaçant comme s'il faisait partie du même cristal, l'écart des images sera doublé ainsi que B le représente. Si ensuite on tourne un peu le rhomboïde supérieur, deux images faibles apparaissent entre les deux autres qui perdent quelque chose de leur vivacité (C); quand l'angle des sections principales est de 45°, les quatre images sont égales (D); l'angle augmentant, les images extrêmes s'affaiblissent et les intérieures se renforcent (E); ces dernières subsistent seules au moment où l'angle des sections est de 90° (F). En continuant toujours de tourner, les images s'écartent, et on en voit naître deux autres entre elles (G); pour une rotation de 135° les quatre images redeviennent égales (H); un peu plus loin les extrêmes s'effacent (I); et enfin les moyennes qui restent seules visibles se confondent en une seule quand les deux sections coïncident, le rhomboïde supérieur ayant tourné de 180°. On peut remarquer que les quatre images forment un losange dont les côtés restent constants, et dont les angles seuls varient.

Fig. 538. Pour nous rendre compte de ces phénomènes, soient A A′, $a\ a'$ les sections principales des deux rhomboïdes dans la première position; le rayon S I donne un rayon ordinaire I O et un rayon extraordinaire I E qui deviennent parallèles à l'émergente. O i donne un rayon ordinaire $i\ o$, et un rayon extraordinaire nul $i\ e$; au contraire, E i' donne un rayon ordinaire nul $i'\ o'$, et un rayon extraordinaire $i'\ e'$; on voit déjà que l'écartement $o\ e'$ est double de O E. Maintenant, pendant la rotation du rhomboïde supérieur, les rayons qui étaient nuls doivent apparaître, les extraordinaires décrivant des cercles autour des ordinaires qui restent fixes; nous avons alors pour deux rayons polarisés O i, E i' les phénomènes que nous avons eus pour un seul (1925); et si, en ayant égard à ce que les deux rayons sont polarisés à angle droit, on transporte séparément sur des cercles conjugués les couples d'images de la figure 535, on reconnaîtra les différents cas de l'expérience.
Fig. 539.

Au lieu de deux rhomboïdes, on peut très bien employer deux prismes biréfringents qu'on établit vis-à-vis une ouverture à travers laquelle passe la lumière du ciel ou celle

du soleil; on choisit des distances telles que les écarts produits par chaque prisme soient égaux.

1928. On entend par *polarimètre* un instrument propre à déterminer la quantité de lumière polarisée que contient un rayon polarisé partiellement; en voici un dont l'idée appartient à M. Babinet; nous en comprendrons facilement la disposition d'après ce que nous venons de voir sur l'expérience des rhomboïdes superposés. Mettons une lame de mica sur le trajet de chacun des rayons donnés par le premier rhomboïde; alors chaque rayon se trouvant divisé en deux autres polarisés à angle droit (1926), il y aura une image ordinaire et une image extraordinaire, ce qui en fera quatre, même dans la première position, c'est-à-dire quand les rhomboïdes auront leurs arêtes semblables parallèles; seulement les deux moyennes seront superposées. Imaginons maintenant que le rayon SI soit polarisé en partie; son intensité totale peut être représentée par $2a+b$ (1850), et il s'agit de déterminer la fraction $\frac{b}{2a+b}$ de lumière polarisée qu'il contient. Pour cela, on tourne les lames de mica dans leur plan jusqu'à ce que l'image moyenne soit neutre, ce dont on s'assure avec un polariscope; alors on est sûr que les deux faisceaux polarisés à angle droit qui la composent sont égaux; d'après la position des lames on connaît les fractions k et k' qu'elles prennent chacune sur Oi et Ei' pour composer ie et $i'o'$. Mais l'intensité de ie et de $i'o'$ est ici la même, c'est-à-dire que $kOi=k'Ei'$; d'ailleurs si $Oi > Ei'$, on a Oi : Ei' :: $a+b$: a, d'où $k(a+b)=k'a'$, et par suite $\frac{b}{2a+b}=\frac{k'-k}{k+k'}$.

Polarimètre de Babinet

Fig. 538.

1929. Nous pouvons maintenant comprendre une modification qui double l'écart des images dans le prisme biréfringent (1898). Dans le premier prisme ABC l'axe est parallèle à la face BA, et en même temps perpendiculaire aux arêtes. Il résulte de cette disposition que le rayon incident SI se divise en deux autres, polarisés à angle droit, et qui restent superposés jusqu'à la jonction des prismes; leurs plans de polarisation sont tels que l'ordinaire dans le premier prisme forme l'extraordinaire dans le deuxième, *et vice versâ*. Le premier se comporte donc comme nous l'avons vu (1898); quant à l'autre, sa vitesse étant plus grande dans le

Prisme biréfringent de Wollaston.

Fig. 540.

deuxième prisme, il s'écarte de la perpendiculaire autant que le premier s'en rapproche; la réfraction à la sortie est aussi la même en sens inverse, de sorte que l'angle de bifurcation se trouve doublé. Dans cette disposition, qui est aujourd'hui préférée, l'image extraordinaire ne décrit plus un cercle autour de l'image ordinaire quand on tourne le prisme; ces deux images sont également déviées, comme on peut s'en assurer en regardant une ligne assez longue pour être vue en même temps de l'autre œil. A la rigueur, le prisme n'est achromatique pour aucune image, mais cet inconvénient est insensible quand l'angle de bifurcation est petit. Dans le cas de la figure, l'image extraordinaire doit paraître rapprochée du sommet du prisme oculaire BCD; elle s'efface par une tourmaline dont l'axe est dans le plan de réfraction; l'image ordinaire prend la place de l'extraordinaire quand on tourne vers l'objet le prisme qui était vers l'œil.

Prisme biréfringent employé comme polariscope.

1930. D'après ce que nous avons vu précédemment (1925), il est clair qu'un prisme biréfringent peut très bien servir de polariscope (1830). Pour qu'il indique le plan de polarisation il est nécessaire qu'on puisse distinguer l'image extraordinaire; c'est ce qu'on obtient avec le prisme de Rochon (1898), ou mieux avec le prisme de M. Biot, qui se compose d'un prisme de spath S taillé comme l'indique la figure, et achromatisé par un prisme de verre V de même angle; la déviation et la coloration du rayon ordinaire sont à peu près nulles, l'image extraordinaire est la plus éloignée de l'angle réfringent du spath, elle s'en éloigne encore et se colore fortement quand on incline le prisme: on la reconnaît donc facilement. D'ailleurs elle est polarisée perpendiculairement à la section principale, qui est ici le plan de réfraction; il suit de là que le plan de polarisation d'un rayon qu'on analyse est donné par la section principale quand l'image extraordinaire s'éteint ou présente un minimum: si elle s'éteint complétement, on est sûr que la lumière incidente est tout entière polarisée en ligne droite; si l'extinction n'est pas complète, c'est que la polarisation est partielle ou elliptique, enfin, s'il n'y a aucune différence d'intensité dans les diverses positions du prisme, on peut affirmer que la lumière n'est nullement polarisée ou qu'elle l'est circulaire-

Fig. 541.

ment. C'est en regardant à travers un prisme biréfringent la lumière du soleil réfléchie sur les fenêtres du Luxembourg que Malus a été conduit à la découverte de la polarisation (1818).

1931. On sait qu'une lame cristallisée permet le passage de la lumière quand on l'interpose dans la pince à tourmalines (1879); on dit alors qu'elle *dépolarise* la lumière; dans la réalité elle décompose chaque vibration en deux autres qui peuvent alors fournir des composantes dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration primitive. Pour que la dépolarisation soit complète, il faut que le plan de polarisation fasse un angle de 45° avec une des sections principales de la lame. Il est évident que la lame est sans effet quand elle a une section principale parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation. Moyen de dépolariser la lumière.

1932. Cela fournit un moyen très simple de reconnaître les sections principales; ainsi, pour avoir celles d'une lame de mica, on met la lame entre les tourmalines croisées, et on la tourne jusqu'à ce que l'obscurité soit aussi complète qu'auparavant : les axes des tourmalines donnent alors les directions cherchées. Il ne faut pas mettre l'œil trop près, parce qu'on recevrait des rayons qui n'auraient pas marché dans les sections principales. On peut aussi se servir de l'appareil de Norremberg; la plaque se pose sur l'anneau IK, qu'on rétrécit par un diaphragme. Au lieu d'une tourmaline en L; on emploie si on veut la glace MN dont le plan de réflexion doit être à angle droit sur celui de la glace AB; ces plans coupent la lame suivant les sections principales quand l'obscurité est complète. Enfin, on peut se servir d'un prisme biréfringent en L en mettant son plan de réfraction à angle droit avec le plan de réflexion; le diaphragme doit se placer sur la glace étamée GH pour que les deux images ne se superposent pas. On tourne la lame jusqu'à ce que l'une d'elles s'éteigne; les plans de réflexion et de réfraction donnent alors les sections principales; nous faisons abstraction pour le moment des couleurs qui se développent dans ces circonstances. — de reconnaître les sections principales. Fig. 534.

1933. Quand on construit des piles polarisantes de mica (1839), il est essentiel que chaque lame ait une section principale dans le plan de réfraction. La première lame décom- Remarque sur les piles de mica.

pose la lumière en deux faisceaux polarisés, l'un dans le plan de réflexion, l'autre dans le plan de réfraction; le premier faisceau va toujours en s'affaiblissant par la réflexion sur les lames successives, surtout si l'incidence a lieu sous l'angle de polarisation; l'autre se transmet presque sans perte, de sorte qu'on finit par avoir de la lumière polarisée pure; la double réfraction dans tout cela ne joue aucun rôle; les choses se passent comme avec des lames de verre. Mais si les lames de mica étaient disposées au hasard, l'influence de la double réfraction se ferait sentir, et la lumière polarisée par les unes serait dépolarisée par les autres.

Moyen de produire la polarisation elliptique et circulaire.

1934. Les deux rayons polarisés à angle droit transmis par une lame mince, ayant une certaine différence de marche et se trouvant superposés, ils doivent en général former de la lumière douée de la polarisation elliptique. Quand le plan de polarisation du rayon incident divise en deux parties égales l'angle droit formé par deux sections principales de la lame, les rayons ont la même intensité, et si l'épaisseur donne une différence de phase égale à un nombre impair de quarts d'ondulation, toutes les conditions de la polarisation circulaire se trouvent remplies. Cela suppose la lumière homogène; cependant, avec la lumière composée, la polarisation serait encore sensiblement circulaire si la différence de phase n'était que d'un quart d'ondulation.

§ II. *Rotation du plan de polarisation.*

Rotation du plan de polarisation dans le quartz.

1935. Les plaques de cristal de roche taillées perpendiculairement à l'axe ont la propriété de faire tourner le plan de polarisation des rayons qui les traversent. Comme cette rotation est fort inégale pour les rayons de différentes couleurs, il faut opérer avec de la lumière simple quand on veut l'observer nettement; il suffit pour cela de tenir un verre monochromatique au-devant de l'œil. On peut se servir de l'appareil de Norremberg; on y dispose le prisme biréfringent de manière, par exemple, que l'image extraordinaire soit éteinte; la section principale du prisme se confond alors avec le plan de polarisation du rayon incident. On pose ensuite la lame de cristal de roche sur l'anneau, ce qui fait reparaître l'image extraordinaire; mais en tournant le prisme

peu à peu, on trouve une position où elle s'éteint de nouveau; la section principale donne alors le nouveau plan de polarisation. Pour déterminer le sens dans lequel ce plan a tourné, le moyen le plus simple est de prendre la rotation à son origine en opérant d'abord sur des lames peu épaisses. D'après M. Biot, à qui l'on doit les lois de ces phénomènes, une plaque de un millimètre d'épaisseur produit une rotation de 18° 1/2 pour le rouge que donnent les verres colorés par le protoxide de cuivre; la rotation pour le violet est de plus de 40°; pour les autres couleurs elle est intermédiaire; en général, pour le cristal de roche et la plupart des substances dont nous parlerons ci-après, elle est réciproque au carré de la longueur d'ondulation. Elle est d'ailleurs proportionnelle à l'épaisseur traversée; ainsi une plaque de deux millimètres donne une rotation de 37° pour le rouge et de 80° pour le violet. Certains échantillons de quartz tournent à droite, d'autres à gauche, et le pouvoir rotatoire est exactement le même dans les deux cas. Lorsque plusieurs lames sont superposées, l'effet total est égal à la *somme* des effets produits par chacune d'elles, si elles opèrent dans le même sens; on a *la différence* si elles opèrent en sens contraire; ainsi deux lames de même épaisseur tournant en sens inverse, ne produisent aucun changement dans le plan de polarisation. Le quartz perd son pouvoir rotatoire quand il a été fondu par le feu ou dissous par des agents chimiques; ce pouvoir dépend donc de l'arrangement des particules ou de la cristallisation. Il est à noter que dans une même lame on trouve quelquefois des parties où la rotation est inverse et d'autres où elle est nulle.

1936. La rotation du plan de polarisation dérive de la double réfraction que le quartz exerce suivant son axe (1896). Un rayon qui pénètre perpendiculairement se trouve décomposé en deux rayons superposés, mais marchant avec des vitesses inégales; ces rayons sont polarisés circulairement en sens inverse (1897), et il en résulte un rayon polarisé en ligne droite dont le plan de polarisation tourne progressivement (1870); il est facile de voir que $\frac{(v-v')\,e}{vl}\,180°$ est l'angle de rotation, $v-v'$ étant la différence de vitesse, e l'épaisseur traversée et **Sa cause.**

l la longueur d'ondulation. Comme l et v sont moindres pour les rayons plus réfrangibles, et que Fresnel d'ailleurs a constaté que la différence de vitesse entre les deux rayons violets, par exemple, était plus grande qu'entre les deux rayons rouges (1896), il s'ensuit que la rotation dans le quartz doit augmenter considérablement avec la réfrangibilité, comme l'expérience le prouve. Les deux rayons polarisés circulairement en sens inverse produits par la lumière naturelle, redonnent de la lumière naturelle à l'émergence, car on a toujours une suite de rayons polarisés dans tous les azimuts, peu importe que ces azimuts aient changé.

Couleurs qui en résultent.

1937. Quand on supprime le verre rouge dans l'expérience précédente et que l'épaisseur de la lame est d'environ un demi-centimètre, on a des images vivement colorées que M. Arago a observées le premier; c'est même l'observation de ces images qui a fait découvrir la rotation des plans de polarisation. Les couleurs changent à mesure qu'on fait tourner le prisme; ainsi l'image extraordinaire, par exemple, primitivement violette, devient, pendant une demi-circonférence, bleue, verte, jaune, rouge pourpre et violette; on reconnaît l'ordre du spectre, mais il y a aussi des nuances étrangères. Il est à noter que les deux images sont complémentaires, car leur partie commune est toujours blanche. Les épaisseurs qui donnent les couleurs sont comprises entre 1/2 millimètre et 2 ou 3 centimètres; la teinte du reste varie avec l'épaisseur. Avec le miroir d'épreuve, la tourmaline, etc., on n'a qu'une image; mais les couleurs n'ont ni l'éclat ni la pureté de celles qu'on obtient avec le prisme biréfringent.

La rotation du plan de polarisation peut se mesurer à l'œil nu d'après la marche des couleurs; pour cela il faut arrêter le prisme biréfringent dans l'azimut où l'image extraordinaire est le plus sombre possible; sa couleur dans ce cas est un bleu violacé qui suit le bleu foncé et précède immédiatement le rouge jaunâtre. C'est alors comme si on opérait sur les rayons jaunes moyens; en multipliant la rotation observée par $\frac{3}{4}$, qui est le rapport inverse des carrés d'ondulation, on obtient la rotation propre au rayon rouge.

1938. Pour concevoir la production des couleurs, il faut observer qu'avec une lumière homogène on a des variations d'intensité comme si le quartz n'existait pas (1925), seulement les maxima et les minima sont déplacés. Or, ce déplacement n'est pas le même pour les différentes lumières homogènes, puisque les plans de polarisation ne coïncident pas. Par conséquent, lorsqu'on opère avec la lumière composée, l'image qu'on obtient se trouve formée par la superposition des images de toutes les couleurs, dont les unes peuvent avoir tout leur éclat, tandis que les autres sont presque éteintes, ce qui altère en général les proportions qui constituent la lumière blanche. L'altération est peu marquée quand la plaque est très mince, parce qu'alors les plans de polarisation des diverses couleurs coïncident presque; au contraire, quand la plaque est très épaisse, les plans de polarisation sont tellement dispersés, non seulement pour les diverses couleurs, mais *même pour les diverses nuances*, que chaque couleur se trouve polarisée dans tous les azimuts; ce qui équivaut à une dépolarisation complète; ainsi les images doivent être blanches pour des épaisseurs très petites et très grandes. On conçoit qu'elles doivent être complémentaires, puisqu'il n'y a pas ici d'interférence, et que dès lors on retrouve évidemment dans l'une ce qui manque dans l'autre. Théorie de leur production.

La lumière naturelle se composant d'une suite de rayons très courts polarisés dans tous les azimuts, on peut dire de chacun de ces rayons ce que nous avons dit d'un seul; et si les images ne sont pas alors colorées, cela tient à ce que les effets contraires produits par les rayons polarisés dans des directions rectangulaires se compensent et se masquent mutuellement.

La lumière polarisée circulairement ne donne pas de couleurs, parce qu'elle ne se divise pas en pénétrant dans le cristal de roche suivant son axe; on conçoit en effet qu'il ne peut pas y avoir de double réfraction dès que la lumière incidente a précisément la polarisation qu'elle doit avoir dans le milieu où elle pénètre.

1939. Une plaque de cristal de roche à faces parallèles, taillée perpendiculairement à l'axe, et ayant environ 5 millimètres d'épaisseur, forme un très bon polariscope quand Polariscope de M. Arago.

on regarde à travers en armant l'œil d'un prisme biréfringent. Si on a des couleurs, c'est que la lumière est polarisée au moins partiellement. La plaque s'ajuste au bout d'un tube et le prisme à l'autre bout; de cette manière les deux images sont séparées. Cet instrument, appelé *polariscope à lunules*, fait aisément reconnaître la polarisation de la lumière réfléchie par l'atmosphère (1832).

Rotation des substances autres que le quartz.

1940. De toutes les substances inorganiques étudiées jusqu'ici, le cristal de roche est la seule qui fasse tourner le plan de polarisation; mais M. Biot a rencontré la même propriété dans un grand nombre de substances d'origine organique; ce sont presque toujours des liquides; d'où l'on conclut que le pouvoir rotatoire de ces substances dépend de la constitution des molécules mêmes et non pas de leur arrangement; et ce qui confirme cette idée, c'est que le pouvoir rotatoire peut se conserver même à l'état aériforme comme M. Biot l'a constaté sur la vapeur d'essence de térébenthine. On a ainsi la preuve que les molécules des gaz eux-mêmes peuvent être composées d'atomes disposés dans un ordre déterminé et capable de produire la double réfraction circulaire. Cette double réfraction, du reste, dans les liquides mêmes est beaucoup plus faible que celle qui résulte de la cristallisation dans le quartz, et infiniment plus faible que la double réfraction plane qu'on observe en général dans les cristaux. C'est ce qui fait que le pouvoir rotatoire devient presque toujours insensible lors de la solidification; M. Biot n'a pu en constater la persistance que dans le sucre rendu incristallisable par la fusion et la dextrine réduite en plaques diaphanes.

Rotation en liquides.

1941. Les expériences sur les liquides se font dans des tubes de cuivre étamés intérieurement et fermés par des glaces; ces tubes s'allongent comme les tuyaux de lunette; leur longueur va quelquefois jusqu'à un mètre; on les pose sur l'appareil de Norremberg. Voici la rotation produite par quelques liquides pour une épaisseur de 160 millimètres, en employant un verre rouge coloré par le protoxide de cuivre.

Huile essentielle de térébenthine.	48° G
Huile essentielle de citron.	96 D

Sucre dissous dans l'eau.

Proportion de sucre dans l'unité de poids de la dissolution.	Densité de la dissolution.	Rotation.
0,01	1,004	0°,89 D
0,02	1,008	1 ,78
0,04	1,016	3 ,59
0,06	1,024	5 ,43
0,10	1,040	9 ,20
0,15	1,062	14 ,08
0,25	1,105	24 ,41
0,50	1,231	54 ,45
0,65	1,311	75 ,39

En supposant les proportions et les densités égales, la rotation produite par la *dextrine* est à celle que produit le sucre :: 100 : 82.

Les lettres D et G indiquent si la rotation a lieu vers la droite ou vers la gauche de l'observateur. La rotation, du reste, est toujours proportionnelle à l'épaisseur traversée ; elle suit en général les mêmes lois que dans le cristal de roche. Ainsi l'essence de térébenthine, sous une épaisseur soixante-deux fois aussi grande, produit la même rotation et les mêmes couleurs que le cristal ; de sorte que quand les rotations sont en sens inverse, les deux épaisseurs se compensent exactement. Il est à noter cependant que la rotation n'est pas toujours plus grande pour les couleurs plus réfrangibles ; par exemple l'acide tartrique dissous dans une certaine proportion d'eau produit une plus forte rotation pour les rayons verts que pour tous les autres ; il peut même arriver que le sens de la rotation soit différent pour les différents rayons.

1942. Comme la rotation résulte de l'action de chaque molécule, on conçoit qu'elle doit être proportionnelle au nombre des molécules qui se trouvent sur le trajet du rayon ; or, dans un tube invariable le nombre devient double quand la densité du liquide devient double ; moitié moindre quand la substance active ne forme que la moitié du liquide sur lequel on opère. D'après cela, soit A la rotation observée quand p est la proportion de la substance active, d la den- Calcul de la rotation.

sité du liquide, et l la longueur du tube; en désignant par a la rotation pour $p = 1$, $d = 1$, $l = 1$, on a l'équation $A = apdl$. a, qui est le *pouvoir rotatoire spécifique*, se tire de l'équation même par une première observation qui donne A; on peut ensuite calculer les rotations pour toutes les valeurs de p, de d et de l. M. Biot a reconnu que cette formule se vérifiait tant qu'il n'y avait pas d'action chimique. Prenons un exemple pour montrer comment on détermine la constante a. 3gr.,6 de camphre naturel ont été dissous dans 11gr.,5 d'alcool; la densité de la dissolution a été 0,857. Observé à travers un tube de 78 millimètres, le liquide était sensiblement incolore, ce qui permettait de mesurer la rotation à l'œil nu (1937). Or, on l'a trouvée de 7°,55 vers la droite pour les rayons jaunes. Comme la somme des poids employés est 15gr.,1 la proportion pondérale du camphre ou $p = \frac{3,6}{15,1} = 0,238$. Avec ces données, en prenant le décimètre pour unité, on trouve $a = 46°,55$, et par suite

$$A = 46°,55\, pdl.$$

Cette formule donne la rotation que produit le camphre naturel, dissous dans un liquide quelconque qui n'altère pas sa constitution, et qui n'est pas lui-même doué du pouvoir rotatoire. Cette rotation se rapporte aux rayons jaunes; si on voulait celle qui se rapporte aux rayons rouges il faudrait prendre $a = 35°,69$ (1937). On ne doit pas oublier que la rotation se fait vers la droite.

Quand on mêle deux substances douées du pouvoir rotatoire, mais qui n'ont pas d'action chimique l'une sur l'autre, la rotation totale est la somme ou la différence des rotations partielles, suivant qu'elles se font dans le même sens ou en sens inverse; aussi voit-on les essences de citron et de térébenthine se compenser quand on les mêle dans le rapport de 1 à 2, en volumes ou en poids, car la densité est la même.

Applications à la chimie. 1943. Lorsque la rotation trouvée par expérience diffère de celle qu'on a calculée dans l'hypothèse d'un simple mélange, on peut conclure en général qu'il s'est produit une action chimique; on arrive ainsi dans certains cas à distinguer une combinaison d'un mélange. Par exemple, ce n'est

pas un simple mélange qui a lieu quand on ajoute de l'eau à une solution d'acide tartrique, car la rotation va toujours en augmentant. Dans ces dissolutions la rotation augmente avec la chaleur et diminue avec le froid, les faibles alternatives de la température atmosphérique suffisent pour produire ces changements qui révèlent des changements inappréciables jusqu'ici à l'analyse chimique. Nous ferons observer néanmoins que des combinaisons peuvent se faire sans que le pouvoir rotatoire change : ainsi le camphre artificiel ne présente ni plus ni moins de rotation que l'essence de térébenthine qui lui donne naissance en se combinant avec l'acide chlorhydrique.

MM. Biot et Persoz se sont servi de la rotation pour étudier plusieurs réactions chimiques; ils ont vu : 1° que la dextrine en se transformant en sucre par l'acide sulfurique, change de pouvoir rotatoire, dans le rapport de 66 à 42, et même à 25; 2° que le sucre de lait change aussi quand il se transforme par les acides en sucre fermentescible; mais au lieu de diminuer, le pouvoir rotatoire augmente dans le rapport de 16 à 20; 3° que le sucre de canne, transformé en sucre de raisin par les acides, change tellement de pouvoir rotatoire, qu'une dissolution qui tournait de 42° vers la droite, tourne ensuite de 15° vers la gauche; 4° qu'une dissolution de gomme, ayant une rotation de 12° vers la gauche, en acquiert une de 22° vers la droite par l'action des acides étendus d'eau.

Le pouvoir rotatoire donne un nouveau moyen de distinction entre les substances qui sont formées des mêmes éléments dans les mêmes proportions, et que pour cette raison l'on appelle *isomères*. Ainsi le camphre naturel donne, avec la potasse, des dissolutions dont la rotation s'accorde avec la formule, et il n'en est pas de même de l'huile qui lui est isomère. — On distingue immédiatement l'essence de térébenthine qui tourne à droite, de l'essence de citron qui tourne à gauche; — l'acide tartrique qui tourne à droite, et l'acide paratartrique qui n'a pas de rotation. — M. Berzélius reconnaît aujourd'hui pour isomères le sucre de canne, la gomme arabique, l'inuline, la dextrine. Le sucre et la dextrine tournent à droite, mais leur action est inégale en intensité; elle est d'ailleurs modifiée d'une manière toute

différente quand on expose les deux substances à certains agents chimiques. La gomme arabique et l'inuline tournent à gauche, et les agents chimiques modifient aussi cette rotation très inégalement.

Par la mesure de la rotation l'on suit les progrès de la transformation de la fécule et de la gomme en sucre; on détermine la richesse des sirops à toutes les époques de la fabrication et du raffinage; on reconnaît de grandes différences dans les sucres d'espèces différentes, soit cristallisables, soit incristallisables; on distingue immédiatement les sucs végétaux qui peuvent donner du sucre analogue au sucre de canne, et ceux qui ne peuvent donner que du sucre semblable au sucre de raisin. Ce dernier sucre, soit qu'on le retire du raisin ou des autres fruits, possède la singulière propriété de tourner à gauche tant qu'il n'a pas pris l'état solide, et de tourner à droite une fois qu'il a été solidifié, lors même qu'on vient ensuite à le dissoudre dans l'eau ou dans l'alcool.

Double réfraction de la chaleur avec polarisation rectiligne.

1944. Les milieux biréfringents agissent sur la chaleur exactement comme sur la lumière; M. Forbes l'a démontré le premier en interposant une lame de mica entre deux piles polarisantes (1855); il a constaté que la deuxième pile laissait passer plus ou moins de chaleur, suivant la position des sections principales de la lame (1931, 1933). On peut ainsi dépolariser complétement la chaleur. En tenant compte de l'absorption, M. Melloni s'est assuré que les tourmalines polarisaient la chaleur et arrêtaient la chaleur polarisée, comme elles font pour la lumière; il est donc certain que la chaleur éprouve la double réfraction et la polarisation rectiligne. Elle éprouve aussi la polarisation circulaire par double réfraction et la rotation du plan de polarisation; MM. Biot et Melloni l'ont constaté en interposant une lame de cristal de roche entre les piles polarisantes; la chaleur, qui était d'abord arrêtée, pouvait passer en partie, parce que le plan de polarisation se trouvait changé. Une lame de même épaisseur que la première, mais tournant en sens inverse, détruisait tout l'effet en ramenant le plan de polarisation à sa direction primitive. Au contraire, avec deux lames ayant le même sens de rotation, la transmission se trouvait plus forte. Une plaque épaisse de 41 millim. qui dispersait les plans de polarisation du rayon lumineux jus-

— avec polarisation circulaire et rotation du plan de polarisation.

qu'au point de donner deux images sensiblement incolores et d'égale intensité, lorsqu'on la faisait traverser par de la lumière blanche polarisée, agissait de même sur les rayons calorifiques; non seulement la transmission par la deuxième pile se trouvait augmentée tout-à-coup dans une grande proportion, mais encore elle restait constante quand on faisait tourner coniquement cette deuxième pile autour de l'axe du faisceau transmis; la plaque épaisse avait ramené à l'état de chaleur naturelle le flux qui lui était arrivé polarisé dans un seul plan. Ces deux dernières expériences prouvent que les plans de polarisation des divers rayons calorifiques éprouvent des rotations inégales, comme cela arrive avec les rayons lumineux de couleurs différentes.

§ III. *Couleurs produites par interférence.*

1945. Les lames minces cristallisées présentent des couleurs très-remarquables quand on les fait traverser par de la lumière blanche polarisée, qu'on polarise ensuite de nouveau après l'émergence. L'expérience se fait très bien avec des lames de mica ou de chaux sulfatée ayant environ 1/5 de millimètre d'épaisseur; on établit horizontalement une glace noire ou une pile de vitres devant une fenêtre d'où l'on découvre le ciel; en se plaçant à une distance convenable, on a un large faisceau de lumière polarisée sur le trajet duquel on tient la lame que l'on regarde avec un prisme biréfringent; on voit alors deux images vivement colorées, dont les teintes sont complémentaires, car la partie commune est blanche. Pour peu qu'on incline la lame, les couleurs varient, passant avec rapidité du rouge le plus chargé aux teintes les plus riches de jaune, de vert, de bleu et de pourpre. La couleur change aussi suivant l'épaisseur de la lame, et la même lame présente souvent plusieurs couleurs nettement tranchées, quand son épaisseur est inégale.

Couleurs des lames minces cristallisées.

Avec des feuilles de mica de diverses épaisseurs, ou qu'on superpose en partie, on forme des assemblages incolores à la lumière ordinaire, et qui à la lumière polarisée deviennent des vitraux colorés. On fait aussi des dessins, des chiffres de diverses couleurs, en gravant plus ou moins profondément un lame de sulfate de chaux d'un demi-millimètre

d'épaisseur, collée sur du verre; l'eau suffit pour polir les traits du burin. Quand la lumière du ciel est polarisée (1832), il suffit de la recevoir directement sur les lames. Si on veut n'avoir qu'une image, on peut remplacer le prisme biréfringent par une pile de glaces ou une tourmaline. C'est à M. Arago qu'on doit la découverte des couleurs données par les lames minces cristallisées.

Interférences qui les produisent.

1946. Pour concevoir leur formation, nous supposerons d'abord que la lumière incidente soit homogène; cette lumière se divise dans la lame en deux faisceaux polarisés à angle droit qui restent sensiblement superposés, mais qui marchent avec des vitesses inégales. A la sortie la polarisation devient elliptique à cause de la différence de phase (1857), cependant on peut toujours considérer séparément les deux rayons polarisés à angle droit; chacun d'eux en traversant le prisme donne une image ordinaire et une image extraordinaire. Les deux images ordinaires sont superposées, mais leurs intensités ne s'ajoutent pas simplement, car il y a différence de phase dans les rayons qui les composent, et par suite interférence. Maintenant comme la différence de phase n'est pas la même pour les rayons des diverses couleurs, l'interférence peut être complète, par exemple, pour les uns et nulle pour les autres, de sorte que les proportions qui constituent la lumière blanche se trouvent nécessairement altérées. Le même raisonnement s'appliquerait à l'image extraordinaire. Ainsi, en définitive, les couleurs des deux images sont dues à des interférences provenant de ce que les deux rayons ont traversé la lame avec des vitesses différentes; seulement ces interférences n'ont lieu qu'entre des rayons ramenés au même plan de polarisation, soit dans l'image ordinaire, soit dans l'image extraordinaire.

Marche de la lumière.

1947. La marche de la lumière étant assez compliquée dans le cas que nous venons d'examiner, il est bon de la suivre sur une figure; soit donc SI le rayon incident qui est polarisé en ligne droite, LL' la lame cristallisée; AB, CD, seront les deux rayons polarisés à angle droit, qui, à la sortie de la lame, forment un rayon doué de la polarisation elliptique; AB donne dans le prisme BO pour l'image ordinaire, et BE pour l'image extraordinaire; CD donne de même DO' et DE'; BO et DO', qui forment l'image ordinaire,

sont tous deux polarisés dans la section principale du prisme, et ils ont précisément la différence de marche qui existait entre les rayons AB et CD d'où ils proviennent. La même différence existe aussi entre les rayons BE et DE′, et ceux-ci se trouvent polarisés perpendiculairement à la section principale, puisqu'ils forment l'image extraordinaire. Il est certain d'ailleurs que les deux rayons qui forment chaque image peuvent interférer, car ils proviennent d'un même rayon polarisé SI, et sont ramenés à un même plan de polarisation.

1948. Avec la lumière naturelle on n'a pas de couleurs, parce que les deux rayons polarisés à angle droit que donne la lame sont alors indépendants (1853). Ces faisceaux ne sont pas indépendants quand on emploie de la lumière polarisée circulairement, puisqu'ils proviennent originairement d'un rayon polarisé en ligne droite; aussi dans ce cas on a des couleurs, mais ce ne sont plus les mêmes, à cause de la différence de phase qui existe déjà dans les rayons composants, indépendamment de l'action de la lame. Elles répondent, sur le cercle chromatique de Newton (1665), à des points également distants des deux couleurs complémentaires produites par la lumière douée de la polarisation rectiligne. **Remarque.**

1949. Le calcul fait voir que, malgré les interférences, l'intensité totale reste la même pour chaque lumière simple, abstraction faite des pertes par réflexion et par absorption. Afin de le concevoir, prenons le cas où les vibrations du rayon incident et la section principale du prisme sont dans un même plan PV, avec lequel la section principale LM de la lame fait un angle de 45°. Soit PV = 1 l'écart maximum pour le rayon incident, l'intensité de ce rayon sera représentée par l'unité (1799). Dans la lame, PV se décompose en PM et PN dont la valeur commune est $\frac{1}{\sqrt{2}}$, d'où il suit que l'intensité de chacun des rayons donnés par la double réfraction est $\frac{1}{2}$. Dans le prisme, PM donne PO pour l'image ordinaire, et PE pour l'image extraordinaire; PN donne de même PO′ et PE′; ces écarts ont tous pour valeur $\frac{1}{2}$, et l'intensité des rayons correspondants est $\frac{1}{4}$. Maintenant supposons que la différence de phase soit précisément d'une

Comment les images sont complémentaires.

Fig. 543.

demi-ondulation, alors l'écart PE se trouve détruit par un écart égal à PE', mais dirigé en sens inverse, c'est-à-dire qu'il y a interférence complète entre les rayons qui forment l'image extraordinaire. Pour former l'image ordinaire, PO se combine avec un écart égal à PO', mais dirigé en sens inverse à cause de la différence de phase supposée, d'où il suit que les deux écarts se font dans le même sens et s'ajoutent; leur somme étant 1, l'on retrouve l'intensité primitive tout entière. Pour une autre couleur la lumière se partagerait suivant une autre proportion entre les deux images, mais, comme nous l'avons dit, il n'y aurait de même aucune perte; d'après cela il est clair qu'avec la lumière composée les deux images doivent être complémentaires tant pour l'intensité que pour la couleur.

Rotation de la lame dans son plan. Fig. 534.

1950. Pour suivre avec régularité les phénomènes qui se passent pendant qu'on fait tourner la lame dans son plan, on se sert de l'appareil de Norremberg, qui présente en IK deux anneaux tournant l'un dans l'autre; l'intérieur est formé par une lame de verre sur laquelle on fixe la lame. Mettons d'abord la section principale du prisme à angle droit avec le plan de polarisation du rayon incident, alors l'image extraordinaire est seule visible. Quand on ajoute la lame, les deux images apparaissent. Nous supposerons que l'extraordinaire est rouge, et que l'ordinaire est verte; elles auront la forme de deux disques circulaires réguliers, si on a mis sur la glace inférieure un diaphragme percé d'un trou circulaire. En tournant la lame il est très facile d'éteindre de nouveau l'image ordinaire, l'autre alors reparaît blanche comme auparavant; cela montre qu'une des sections principales de la lame coïncide avec le plan de polarisation (1932), et que le rayon polarisé traverse la lame sans se diviser. Maintenant si nous partons de cette position pour faire tourner l'anneau dans son plan, nous voyons que l'image se colore peu à peu; c'est à 45° que la coloration est la plus forte; à 90° l'image est redevenue blanche; elle est ainsi blanche à chaque quart de tour, et au milieu de l'intervalle elle présente sa couleur la plus vive, qui du reste est toujours le rouge, comme nous l'avons supposé d'abord. Quant à l'image ordinaire elle s'éteint ou paraît verte suivant que l'autre est blanche ou rouge; le maximum de coloration a

toujours lieu à la fois pour les deux images. Il est évident que ce maximum doit se produire quand les sections principales de la lame font des angles de 45° avec le plan de polarisation du rayon incident, puisqu'alors les rayons qui forment chaque image ont la même intensité et peuvent interférer complétement; le vert, par exemple, peut être entièrement détruit dans l'image extraordinaire, du moins si l'épaisseur de la lame est convenable.

1951. Laissons maintenant la lame dans la position qui donne les couleurs les plus vives et faisons tourner le prisme à son tour; celui-ci recevra toujours deux rayons égaux, polarisés à angle droit; ces deux rayons passeront sans se diviser; l'un comme ordinaire, l'autre comme extraordinaire, quand la section principale du prisme sera parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame; ainsi à chaque quart de tour on aura deux images blanches d'égale intensité. Dans les intervalles les couleurs reparaîtront comme tout-à-l'heure, mais d'une manière alternative, c'est-à-dire que l'image extraordinaire étant rouge dans le premier intervalle, sera verte dans le deuxième, et ainsi de suite. Ces alternatives proviennent de ce qu'à chaque quart de tour les plans de polarisation des deux images échangent leurs directions; il est d'ailleurs évident que la couleur dépend de la direction suivant laquelle on polarise les rayons donnés par la lame. Dans la figure 544, les lettres B, R, V indiquent les positions où l'image extraordinaire est blanche, rouge et verte; pour l'image ordinaire il faut changer R en V et V en R; B reste le même, car il n'y a plus d'extinction dans ce cas-ci. Les ligne VV, BB, BB, RR indiquent le plan de polarisation du rayon incident, les sections principales de la lame et la section principale du prisme dans sa position initiale.

Rotation du prisme.

Fig. 544.

1952. On voit en définitive qu'une lame exposée perpendiculairement à la lumière polarisée ne donne qu'une seule couleur et sa complémentaire; en variant les angles entre le plan de polarisation, la section de la lame et celle du prisme on fait seulement varier l'intensité. Le calcul montre en effet que les rayons des différentes couleurs sont toujours dans les mêmes proportions pour chaque image entre deux positions d'extinction ou d'images incolores, pourvu que dans ce dernier cas on fasse abstraction de la lumière blanche.

Invariabilité des couleurs.

Influence de l'épaisseur.

1953. Dans les lames cristallisées qui diffèrent seulement en épaisseur et qu'on expose toujours perpendiculairement à la lumière polarisée, les teintes suivent les lois que nous avons trouvées dans les lames minces ordinaires, ou dans les anneaux colorés (1751). La proportion des épaisseurs successives qui donnent les diverses teintes est exactement la même; mais il y a de grandes différences dans la valeur absolue des épaisseurs. D'après les observations de M. Biot, si on prend pour unité l'épaisseur de la lame d'air, celle du mica de Sibérie sera 440, celle la chaux sulfatée 230, celle de spath d'Islande 13; on suppose ici que la lame de spath est taillée parallèlement à l'axe; pour le cristal de roche, taillé de même, l'épaisseur est égale à celle de la chaux sulfatée. On peut conclure de là que le mica ne donne des couleurs que quand son épaisseur est comprise entre 2 centièmes et 88 centièmes de millimètre; pour la chaux sulfatée et le cristal de roche les limites sont environ 0,01 et 0,46; quant au spath il est à peu près impossible de l'obtenir en lames assez minces, car la plus grande épaisseur ne doit pas dépasser 1/40e de millimètre.

Ce qui fait que l'épaisseur doit être en général si grande dans les lames cristallisées, c'est que les interférences y proviennent non pas d'une différence dans les chemins parcourus, mais seulement d'une différence de vitesse. Les mesures précédentes montrent que la différence de vitesse est environ 18 fois aussi grande dans le spath que dans le cristal de roche, comme on le trouverait d'ailleurs au moyen des indices de la réfraction ordinaire et extraordinaire (1501, 1502). Les épaisseurs au-dessous des limites assignées donnent des différences de phase de 1/5 ou 1/4 d'ondulation; il ne peut pas y avoir alors d'interférence complète; d'ailleurs la différence de phase est presque la même pour les différentes lumières simples, voilà pourquoi l'on n'a pas encore de couleurs. Dans les limites supérieures d'épaisseur la différence de phase est de 8 ou 9 ondulations moyennes; alors si l'interférence est complète, par exemple, pour le rouge de la raie B, il s'en faut de beaucoup qu'elle le soit pour le rouge de la raie C; il en résulte que toutes les couleurs subsistent dans chaque image, ce qui donne un blanc de plus en plus parfait à mesure que l'épaisseur est plus grande.

Il est à noter qu'avec l'appareil de Norremberg (1924) la lumière polarisée traverse deux fois la lame quand celle-ci est posée sur la glace étamée ; c'est alors comme si l'épaisseur devenait double.

1954. On voit manifestement l'influence de l'épaisseur avec un prisme très mince de sulfate de chaux dont les faces sont presque parallèles à celle de clivage ; dans ce cas les couleurs des divers ordres forment des bandes parallèles, alternativement sombres et brillantes. Si la lame est creusée comme une lentille concave, elle donne des anneaux analogues à ceux de Newton, et avec le prisme biréfringent on a deux images complémentaires qui présentent les couleurs, l'une des anneaux réfléchis, l'autre des anneaux transmis. Quand on fait tourner la lame de sulfate de chaux, chacun des anneaux éprouve tous les changements que nous avons indiqués pour une lame à faces parallèles ; il n'y a plus d'anneaux lorsque la section principale de la lame est parallèle ou perpendiculaire soit au plan de polarisation, soit à la section principale du prisme. En remplaçant le prisme par une tourmaline on n'a qu'un système d'anneaux ; les couleurs sont moins vives, mais les anneaux sont plus nets, parce que la lumière est plus homogène. Avec de la lumière tout-à-fait homogène les anneaux obscurs deviennent noirs, ce qui montre qu'on pourrait avoir des lames à faces parallèles qui ne laisseraient point passer de lumière. L'épaisseur devrait être telle que la différence de marche fût précisément d'un nombre entier de demi-ondulations de la lumière employée. Anneaux colorés par inégalité d'épaisseur.

1955. Des lames trop épaisses pour donner des couleurs peuvent en donner quand on les superpose ; par exemple, une lame de spath et une lame de quartz taillées parallèlement à l'axe, et épaisses de plusieurs millimètres, peuvent donner des couleurs quand on les superpose en mettant les axes *parallèles* ; dans la première lame le rayon extraordinaire marche plus vite que le rayon ordinaire (1890), c'est le contraire dans la deuxième lame (1895), et il s'ensuit que si le rapport des épaisseurs est convenable, la différence de marche se trouve d'un petit nombre d'ondulations seulement, ce qui est la condition essentielle de la production des couleurs. Deux lames de spath ou de quartz peuvent aussi donner des couleurs, mais alors il faut que les axes Couleurs données par les lames épaisses.

soient croisés; le rayon ordinaire dans la première lame passe comme rayon extraordinaire dans la seconde; on a dans ce cas la différence de marche qui répond à la différence d'épaisseur. On voit qu'en général les sections principales doivent être parallèles quand les lames appartiennent l'une à un cristal positif, l'autre à un cristal négatif (1885, 1913); au contraire elles doivent être perpendiculaires quand les cristaux sont de même signe; c'est ce qui constitue la *duplication parallèle* et la *duplication croisée*. On trouve ici un nouveau moyen de déterminer le signe des cristaux. C'est en croisant deux lames épaisses de sulfate de chaux que Fresnel a suivi l'influence remarquable de la chaleur sur la double réfraction de cette substance; les deux lames différaient assez en épaisseur pour ne donner que du blanc quand elles étaient à la même température; mais un réchaud ayant été placé sous la plus épaisse, on a vu les teintes monter dans l'ordre des anneaux comme si la lame fût devenue plus mince. Quand on emploie une simple lame assez mince pour présenter des couleurs sans le croisement des axes, la chaleur détruit sa transparence avant que la teinte dépasse la couleur complémentaire. Fresnel n'a pas trouvé que la chaleur eût d'influence sensible sur les feuilles de mica.

Influence de l'inclinaison.

1956. Reprenons maintenant une lame mince de mica ou de chaux sulfatée telle que la donne le clivage, et au lieu de l'exposer perpendiculairement à la lumière polarisée, inclinons-la graduellement, alors nous verrons les couleurs varier rapidement. Il est à noter que suivant le sens de l'inclinaison on obtient l'effet qui résulterait tantôt d'une augmentation, tantôt d'une diminution d'épaisseur. La teinte reste invariable pendant que la lame tourne en conservant la même inclinaison; l'on observe seulement alors des changements d'intensité pareils à ceux que nous avons déjà notés (1950).

On conçoit en général les changements de teinte en observant que la différence de phase dépend non seulement de l'épaisseur traversée, mais aussi de la direction suivant laquelle la lumière marche dans le cristal. Fixons, par exemple, la lame sur l'anneau dans la position qui donne les couleurs les plus vives, en ayant soin qu'une des sections principales soit sur l'axe horizontal autour duquel l'anneau

peut tourner. De cette manière, dans les différentes inclinaisons, le plan de réfraction sera précisément l'une des sections principales; supposons d'abord que ce soit la section moyenne, alors nous verrons que si la teinte est blanche, elle reste telle dans toutes les inclinaisons, mais que si elle est colorée, elle *descend* dans l'ordre des anneaux (1751), devenant de plus en plus pâle, jusqu'à ce qu'enfin elle passe au blanc pour ne plus changer. Les couleurs peuvent bien ne pas être tout-à-fait identiques avec celles des anneaux, mais nous ferons abstraction de quelques légères différences. Ces phénomènes ont lieu quel que soit le sens de l'inclinaison : c'est évidemment l'accroissement d'épaisseur qui joue ici le rôle principal.

Mais si la réfraction se fait dans le plan des axes optiques, la teinte *monte* dans l'ordre des anneaux jusqu'à ce que l'angle d'incidence soit de 33° 48′, cas auquel la lumière marche suivant l'un des axes (1906), car on peut prendre 1,6 pour l'indice du mica. Il n'y a pas alors de double réfraction sensible (1911) ni de changements dans la polarisation, et, par conséquent, pas de couleurs; l'une des images est blanche, l'autre est éteinte. En supposant que l'inclinaison continue à varier, mais de manière à ne pas amener l'autre axe optique, l'image *noire* passe par les couleurs des anneaux réfléchis de tous les ordres. Quand la teinte monte il est certain que la différence de marche diminue; et cela peut avoir lieu malgré l'accroissement d'épaisseur, parce que dans le voisinage des axes les vitesses des deux rayons produits par la double réfraction tendent à devenir égales.

1957. Les phénomènes que nous venons d'indiquer donnent un moyen facile de distinguer les sections principales entre elles (1932); on voit que quand la réfraction se fait dans la section qui contient les axes optiques, on arrive à éteindre une image par le progrès seul de l'inclinaison, ce qui n'a pas lieu dans les autres sections principales. Caractères de la section qui contient les axes optiques.

1958. Avec deux lames de mica d'épaisseur différente, dont on varie l'inclinaison et qu'on peut d'ailleurs superposer de différentes manières, on obtient une série de couleurs à peu près identique avec celle des anneaux de Newton (1751); de plus, chaque teinte est uniforme sur une large étendue, ce qui rend la comparaison facile avec les couleurs Colorigrade.

naturelles. Tel est le principe d'un instrument imaginé par M. Biot, et qu'il a nommé *colorigrade*. La position des lames est déterminée par des cercles divisés de sorte qu'on peut reproduire à volonté chaque nuance.

Anneaux colorés autour des axes.

1959. Jusqu'ici nous n'avons étudié les lames cristallisées qu'en les faisant traverser par des rayons parallèles; nous allons maintenant prendre le cas où la lumière arrive à la fois dans différentes directions. On obtient cette disposition, dans l'appareil de Norremberg, en découvrant entièrement la glace étamée, et en tenant la lame très près du prisme. Alors au lieu d'une teinte uniforme on a des couleurs périodiques, analogues aux anneaux colorés de Newton. La disposition de ces couleurs est plus facile à reconnaître en remplaçant le prisme par une tourmaline; d'abord parce qu'on n'a qu'une image, au lieu de deux, qui se superposaient en partie, et qu'ensuite la lumière est plus homogène. En général, même pour cette expérience, la pince à tourmalines (1879) est préférable à l'appareil de Norremberg, elle donne un champ plus étendu. En écartant les tourmalines on peut incliner la lame entre elles. Supposons que ce soit une lame de mica d'environ un millimètre d'épaisseur qu'on place ainsi, de manière qu'un de ses axes se trouve à peu près suivant la droite qui joint les deux tourmalines, alors on voit des courbes ovales colorées, alternativement brillantes et obscures, qui entourent l'extrémité P de l'axe qu'on appelle le *pôle* des anneaux. On remarque aussi une ligne MN qui est noire quand les tourmalines sont croisées, et qui passe toujours par le pôle; ses extrémités s'élargissent beaucoup; elle est dans le plan des axes quand ce plan est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation du rayon incident; mais lorsque l'angle des deux plans est de 45°, la ligne noire forme une branche d'hyperbole dont la tangente au sommet est perpendiculaire au plan des axes. En inclinant la lame convenablement on observe les mêmes phénomènes autour de l'autre axe, qui se trouve toujours du côté où les anneaux sont plus dilatés; il est même possible, en approchant beaucoup l'œil, d'apercevoir à la fois, au moins en partie, les deux systèmes d'anneaux; on les voit parfaitement avec les cristaux dont l'angle des axes est petit, tels que l'arragonite et surtout le nitrate de potasse; les lames de ces

Cristaux à deux axes. Fig. 545.

Fig. 546.

cristaux doivent être taillées perpendiculairement à la ligne moyenne. On découvre alors des courbes qui enveloppent les deux systèmes, on remarque une ligne sombre AB qui répond à la section moyenne; on a ainsi deux lignes sombres à angle droit, qui se décomposent en deux branches d'hyperboles dès qu'on tourne un peu la pince à tourmaline; la figure 548 donne leur disposition au moment où le plan des axes fait un angle de 45° avec le plan de polarisation du rayon incident. Herschel a reconnu que les lignes enveloppantes ou deux anneaux de même rang formaient des *lemniscates*, courbes dont le caractère est que le produit des distances aux deux pôles est la même pour tous les points. Fig. 547. Fig. 548.

Les cristaux à un axe, taillés perpendiculairement à l'axe, donnent des anneaux circulaires traversés par une croix noire qui reste fixe quand on tourne la plaque dans son plan; le phénomène est très marqué dans le spath d'Islande. La croix noire se change en croix blanche quand les axes des tourmalines sont parallèles; il en est de même des hyperboles et des lignes sombres des cristaux à deux axes. En général, par cette rotation, l'on obtient deux images complémentaires; les anneaux obscurs deviennent brillants, le rouge se change en vert, et ainsi de suite. On voit à la fois les deux images avec un prisme biréfringent au lieu de la tourmaline oculaire; l'angle de bifurcation doit être un peu grand pour que la séparation soit complète. Cristaux à un axe. Fig. 549. Fig. 550.

On peut projeter les anneaux et les lemniscates sur un tableau, en faisant traverser la lame cristallisée par un faisceau conique de rayons solaires. Ce faisceau est donné par un porte-lumière analogue à celui du microscope (1540); la lame est toujours comprise entre les deux tourmalines; la dernière se remplace par un prisme biréfringent si on veut avoir les deux images complémentaires; l'essentiel est que la lumière soit polarisée à l'entrée et à la sortie.

1960. Les courbes colorées qu'on voit en regardant de très près les lames cristallisées, proviennent de ce que la lumière arrive à l'œil dans des directions plus ou moins inclinées, et traverse, par conséquent, des épaisseurs inégales. La différence de phase des deux rayons donnés par la double réfraction varie donc d'un point à l'autre; la suite des points où elle est la même pour chaque couleur, forme les courbes Comment se forment les anneaux.

isochromatiques. Chaque lumière homogène, considérée isolément, donnerait des courbes alternativement noires et de la couleur employée. Les courbes qui répondent aux différentes couleurs ne coïncidant pas en général, il en résulte une succession de lignes irisées plus ou moins diffuses. Quand la lame a ses faces parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe supposé unique, les courbes isochromatiques sont évidemment des cercles ayant leur centre sur l'axe. Dans ce cas l'épaisseur de la lame peut être assez considérable, parce que les rayons étant peu inclinés par rapport à l'axe, la différence de vitesse est très petite; voilà pourquoi l'on peut avoir des couleurs avec le spath malgré l'énergie de sa double réfraction (1953). Les anneaux, du reste, sont d'autant plus larges que la lame est plus mince, puisqu'il faut s'écarter davantage pour obtenir une différence de phase d'une demi-ondulation.

—les croix noire et blanche. Fig. 551.

1961. Sur l'onde ordinaire les vibrations se font suivant des cercles dont le centre est sur l'axe P (1919); sur l'onde extraordinaire les vibrations se font suivant des méridiens tels que PM. D'après cela, soit AB l'axe de la première tourmaline, les vibrations transmises sont parallèles à cet axe, en M elles se trouveront décomposées suivant deux directions rectangulaires PM et ON. Dans le plan AB qui passe par l'œil et par l'axe de la tourmaline il n'y a pas décomposition; il en est de même dans le plan CO perpendiculaire au précédent et passant églement par l'axe. Dans ces deux plans les vibrations lumineuses sont toutes parallèles à l'axe AB de la première tourmaline; la seconde doit donc les arrêter toutes quand elle a son axe perpendiculaire à AB; c'est ce qui explique la croix noire qu'on observe avec les tourmalines croisées. Au contraire, quand les axes sont parallèles, on a une croix blanche, parce que dans chacun des plans AB et CD la lumière passe librement et sans décomposition.

En général on voit que les lignes noires ou blanches qui traversent les anneaux, indiquent les points où la lame ne change pas la polarisation de la lumière incidente. Ces lignes, par conséquent, peuvent faire connaître le sens de la polarisation sur les différents points de l'onde lumineuse.

Distinction des cristaux à

1962. Les anneaux qui entourent les axes optiques donnent le meilleur moyen de distinguer les cristaux à un et à

deux axes. Il suffit pour cela de voir un seul système d'anneaux; dans les cristaux à un axe les anneaux sont traversés par une croix, dans les cristaux à deux axes ils sont traversés seulement par une ligne droite ou par une branche d'hyperbole; les uns et les autres, du reste, peuvent être circulaires ou ovales. Quand les axes sont très voisins, comme dans le nitrate de potasse, les deux systèmes d'anneaux sont presque confondus; il faut alors suivre les mouvements des deux branches d'hyperbole pour ne pas les confondre avec une croix. un et à deux axes.

1963. C'est en étudiant les anneaux, surtout avec de la lumière homogène, qu'on a reconnu les variations que nous avons signalées dans les axes (1907). Dans le nitre, le sucre, l'arragonite, les anneaux violets sont plus grands que les anneaux rouges; c'est tout le contraire dans le carbonate de plomb, la topaze incolore, le diopside, le borax, et surtout dans le sel de la Rochelle (tartrate de potasse et de soude), ou l'angle des axes est de 76° pour la lumière rouge, et de 56° seulement pour la lumière violette. Dans la glaubérite il n'y a qu'un seul axe pour la lumière violette, et il y en a deux inclinés de près de 5° pour la lumière rouge. En général les couleurs des anneaux avec la lumière blanche s'écartent notablement de l'échelle de Newton. Dans l'apophyllite, qui est un cristal à un axe, les teintes des anneaux se réduisent à du jaune verdâtre et à du violet rougeâtre; Herschel a reconnu que ce cristal était positif pour les rayons d'une extrémité du spectre et négatif pour ceux de l'autre extrémité, de sorte qu'il n'y avait point d'anneaux avec la lumière jaune. On a ainsi l'exemple d'un milieu doué de la double réfraction pour certains rayons et non pour d'autres. Variations dans les anneaux.

1964. Les anneaux dans le cristal de roche sont d'une largeur remarquable, ce qui tient à la faiblesse de la double réfraction. Près de l'axe, la croix et les anneaux manquent à cause de la rotation du plan de polarisation (1935). Si on fait tourner la tourmaline oculaire de gauche à droite, la teinte uniforme qui occupe le centre semble engendrer des anneaux quand le quartz tourne à droite; au contraire les anneaux viennent se confondre dans la teinte centrale quand le quartz tourne à gauche, ce qui fournit un moyen facile de distinction. Anneaux du quartz.

Anneaux et couleurs visibles *per se.*

1965. On voit quelquefois les anneaux et les couleurs des lames cristallisées sans qu'il y ait de polarisation, du moins en apparence; par exemple, on peut voir les anneaux de la topase en recevant tout simplement la lumière réfléchie par une lame de cette substance. Mais si on fait attention aux circonstances, on trouve que la lumière incidente SI est polarisée, soit par l'atmosphère (1832), soit par une vitre, un parquet, etc. Maintenant, par l'inclinaison qu'il faut donner à la lame AB, on reconnaît que le rayon réfracté IR marche dans la direction de l'un des axes, et que, de plus, il doit y avoir une polarisation assez forte par la réflexion intérieure; il n'est donc pas étonnant que les anneaux soient visibles pour un œil placé en O de manière à recevoir les rayons voisins de celui que nous venons de considérer.

Fig. 552.

Souvent les cristaux de spath d'Islande sont entrecoupés par des lames où l'ordre de la cristallisation est renversé. Ces lames telles que *a b c d*, sont appelées *hémitropes*, elles sont perpendiculaires à la section principale, et parallèles aux côtés du rhomboïde; elles multiplient les images quand on regarde à travers; en outre, elles donnent de vives couleurs quand elles sont très minces et que la lumière marche à peu près suivant leur axe optique. On conçoit que la portion du cristal situé d'un côté de la lame polarise la lumière incidente, tandis que l'autre portion polarise la lumière émergente; voilà pourquoi les couleurs sont visibles à la lumière ordinaire, on les voit aussi par réflexion. Certains cristaux de nitre et de bicarbonate de plomb présentent quelquefois des anneaux sans aucune polarisation préalable.

Fig. 553.

Polariscopes.

1966. Les interférences produites par la double réfraction fournissent un très bon moyen de reconnaître la lumière polarisée. On peut varier beaucoup les appareils, nous en indiquerons trois seulement: 1° un prisme en spath d'Islande taillé comme celui de Rochon (1898); si la lumière incidente est polarisée on voit les deux systèmes d'anneaux avec la croix noire et la croix blanche; il faut évidemment que la face perpendiculaire à l'axe soit tournée vers les objets; 2° deux lames de quartz parallèles à l'axe, de 5 à 6 millimètres d'épaisseur, qu'on superpose en croisant les axes; on applique sur le système une tourmaline dont la section principale doit faire un angle de 45° avec celles des quartz; si la

lumière est polarisée on voit des branches d'hyperboles; le centre offre une croix noire et un espace blanc suivant que l'axe de la tourmaline est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation; 3° le polariscope de M. Savart (1830) qui diffère de l'appareil précédent en ce que les lames de quartz sont parallèles à l'une des faces naturelles de la pyramide qui termine le cristal; leur épaisseur, qui doit être la même, ne dépasse pas 1 à 2 millimètres. Fig. 554.

1967. Nous avons démontré directement la double réfraction du verre comprimé (1915), on peut aussi la reconnaître au moyen des couleurs périodiques que la lumière polarisée développe. Dans une petite presse à main l'on comprime une plaque de glace ABCD de 2 ou 3 centimètres de côté; alors avec la lumière polarisée on obtient des couleurs très vives, surtout si on pose la plaque sur la glace étamée de l'appareil de Norremberg (1953); les franges et les anneaux sont moins larges, mais en plus grand nombre; la figure 555 donne une idée de leur disposition. Tous ces effets, du reste, sont passagers et cessent avec la compression. On obtient des phénomènes analogues avec les cristaux sans double réfraction, comme le sel marin, le spath fluor, et même avec des gelées que l'on comprime entre deux lames de verre. Quant aux cristaux biréfringents, les effets de la compression sont en général masqués par l'énergie de la double réfraction, mais on parvient à la rendre sensible par le procédé de la duplication des lames (1955). Couleurs développées par des actions mécaniques. 1° Compression. Fig. 555.

En courbant une bande de glace AB il se manifeste avec la lumière polarisée des lignes colorées parallèles à la longueur; c'est encore un effet d'interférence, car Fresnel a constaté, par le procédé du déplacement des franges (1736), que la lumière marchait plus ou moins vite dans le verre ainsi courbé, suivant le sens dans lequel elle était polarisée. 2° Courbure. Fig. 556.

Les compressions et les dilatations que le verre éprouve pendant les vibrations longitudinales (740) lui donnent momentanément une double réfraction, qu'on peut rendre sensible avec la lumière polarisée. M. Biot a fait cette observation sur une lame de verre, longue d'environ 2 mètres; on place un nœud sur la direction du rayon polarisé; chaque friction fait alors paraître un éclair très vif; les couleurs 3° Mouvement vibratoire.

ainsi développées varient avec le mode et l'énergie du mouvement vibratoire.

4° Dilatation et contraction. L'inégale distribution de la chaleur produit, dans le verre et dans d'autres substances, des tensions tout-à-fait pareilles à celles qui résultent d'une violente action mécanique; aussi obtient-on des couleurs périodiques dans le verre inégalement chauffé ou refroidi. On se sert commodément pour cela de petits cadres métalliques très épais qu'on chauffe à la flamme de l'esprit-de-vin, et dans lesquels on met ensuite des pièces de verre d'une forme convenable; ou bien on chauffe le verre d'avance pour le mettre dans le cadre qui doit être froid. Il se produit ainsi des anneaux circulaires et des croix qui disparaissent quand l'équilibre de température est établi.

5° Trempe et induration. Les plaques de verre trempé offrent des couleurs extrêmement vives quand on les met sur la glace étamée de l'appareil de Norremberg. Avec une plaque carrée on a la disposition indiquée figure 557; les couleurs dans ce cas sont permanentes (1915). Elles le sont aussi dans les disques de gélatine qu'on fait solidifier dans des moules. Pour voir les couleurs avec le verre trempé, il suffit de recevoir la lumière que réfléchit intérieurement la plaque à peu près sous l'angle de polarisation, l'œil étant d'ailleurs armé d'une tourmaline ou d'un prisme biréfringent (1962). Une plaque tenue à quelque distance d'une tourmaline perpendiculairement au rayon incident, devient un excellent polariscope; les couleurs sont visibles pour peu que la lumière qui traverse la plaque soit polarisée.

Fig. 557.

Remarques. 1968. Les figures et les courbes colorées que présentent les plaques de verre trempé ou comprimé, diffèrent de celles des lames cristallisées en deux points essentiels : 1° les anneaux dans le spath, par exemple, se déplacent en même temps que l'œil et offrent toujours les mêmes apparences, quel que soit le point de la plaque où s'opère le trajet des rayons lumineux; au lieu que dans les plaques de verre, le point de la plaque où se montre chaque anneau est fixe et reste le même dans toutes les positions de l'œil. Cela montre que l'état de la plaque n'est pas uniforme comme celui d'un corps régulièrement cristallisé; chaque partie a son mode d'action particulier, et les axes de double réfraction chan-

gent réellement de direction d'un point à l'autre; 2° les images produites par chaque plaque dépendent de la manière dont elle est taillée. Si l'on enlève, par exemple, l'un des coins d'un plaque carrée, on voit aussitôt la figure se déformer, et on peut réellement dire que toutes les parties de la plaque sont solidaires, tandis que celles d'un cristal sont indépendantes. **Fig. 558.**

1969. Il est évident que les figures colorées qu'on observe en faisant interférer la lumière polarisée qui a traversé les corps, fournissent un moyen précieux d'étudier la structure moléculaire et les modifications qu'elle éprouve. Ces figures mettent immédiatement en évidence la compressibilité du verre; elles font même reconnaître les lignes d'égale pression qui sont évidemment les lignes isochromatiques. **Applications.**

M. Biot remarque que la lumière polarisée révèle trois modes bien différents de structure dans les corps doués de la double réfraction. Dans les cristaux autres que ceux qui dérivent du cube, nous voyons des phénomènes extrêmement variés, mais qui sont les mêmes pour chaque fragment et pour chaque particule; dans les substances qui ont été fondues et inégalement comprimées, nous reconnaissons une structure qui change à l'instant même si on détache un fragment de la substance. Un troisième cas est celui des corps qui, sans être cristallisés, offrent néanmoins une certaine structure déterminée, étant formés, par exemple, par un assemblage de couches concentriques, de lames ou de fibres parallèles. Alors les phénomènes ne sont pas les mêmes pour les différentes parties, mais ils ne changent point quand le corps est cassé ou déchiré; c'est ce qu'on observe pour les grains de fécule, le cristallin, etc. On conçoit d'après cela qu'il peut être fort utile quelquefois d'éclairer le microscope avec de la lumière polarisée.



LIVRE HUITIÈME.

MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS GÉNÉRALES.

§ I. *Attractions magnétiques.*

Aimant naturel. Attractions qui s'exercent entre l'aimant et le fer.

1970. Il existe dans la nature un minéral connu sous le nom de *pierre d'aimant* ou d'aimant naturel ; c'est un minerai de fer (*oxide ferroso-ferrique*), qui jouit de la propriété d'attirer les parcelles de même métal placées à peu de distance. Les anciens, qui connaissaient cette propriété, donnèrent à ce minerai le nom de μάγνης, dérivé de Magnésia, contrée de la Lydie, où on en trouvait de grandes quantités. Platon parle de la pierre d'aimant dans plusieurs de ses dialogues ; Pline rapporte que Dinocarès proposa à Ptolémée-Philadelphe de bâtir à Alexandrie un temple dont la voûte, garnie de pierres d'aimant, soutiendrait en l'air une statue de la reine Arsinoé.

Les aimants n'ont pas tous la même puissance ; il y en a de très faibles, c'est-à-dire qui, sous un grand volume, n'exercent sur le fer qu'une attraction insensible, qui peuvent à peine en soulever quelques parcelles. Il y en a de très puissants. L'attraction que l'aimant exerce étant une force différente des autres forces connues, a reçu le nom de *force magnétique ;* on en démontre l'existence par les expériences suivantes :

Si l'on présente à un aimant, suivant sa puissance, des morceaux de fer plus ou moins volumineux, à peine en sont-ils approchés à quelques millimètres qu'on les sent devenir plus légers ; ils se précipitent sur sa surface pour y rester suspendus, il faut ensuite un effort plus ou moins considérable pour les en séparer.

Si l'on plonge un aimant par une de ses extrémités dans de la limaille de fer, on voit cette limaille s'attacher à sa surface et les parcelles de fer s'attacher les unes aux autres. Si on emploie un barreau aimanté qui ait la forme d'un rectangle allongé, qu'on le plonge dans la limaille et qu'on le retire ensuite, on voit que les parcelles de limaille ne s'attachent pas également à sa surface sur toutes les parties; c'est surtout à peu de distance des extrémités que cet effet est le plus sensible. On peut voir dans la figure la distribution des parcelles de limaille sur un aimant. On remarque aux extrémités du barreau des filaments très longs qui sont dressés perpendiculairement à sa surface; en s'éloignant de ces points, ils deviennent plus courts et s'inclinent comme s'ils fuyaient les extrémités; enfin, dans la partie moyenne, il ne se dépose aucun filament. On peut encore étudier l'action que tous les points du barreau aimanté exercent sur le fer, en plaçant au-dessus une feuille de papier sur laquelle on projette, au moyen d'un tamis, de la limaille en poudre très fine; si l'on frappe légèrement la feuille de papier, les parcelles de limaille se distribuent comme ci-dessus.

Fig. 559.

§ II. *Pôles des aimants.*

Des pôles d'un aimant et comment on les détermine.

1971. Tout aimant suspendu librement se tourne toujours vers un certain côté. On remarque qu'il est pourvu de deux points, dont l'un affecte le nord et l'autre le sud. On nomme ces points par lesquels il attire le fer avec plus de force *les pôles d'un aimant*, en empruntant cette dénomination de celle des pôles de la terre ou du ciel, parce que l'un se dirige vers le pôle boréal, et l'autre vers le pôle austral ou méridional de la terre, ce qui ne doit s'entendre qu'à peu près, car lorsqu'on introduisit ces noms la déclinaison n'était pas encore connue. L'un des deux pôles de l'aimant qui se dirige vers le nord est nommé le *pôle boréal*, et l'autre qui se dirige vers le sud le *pôle méridional* ou *austral* de l'aimant. Une aiguille aimantée aussi bien que l'aimant même ne prend cette situation qui lui paraît naturelle que lorsqu'elle se trouve hors du voisinage de quelque autre aimant ou du fer. Si une aiguille aimantée se trouve proche d'un aimant, elle se règle dans sa situation sur les pôles de

cet aimant, en sorte que le pôle boréal de l'aimant attire le bout méridional de l'aiguille, et réciproquement le méridional de l'aimant le bout boréal de l'aiguille; c'est pourquoi, en rapportant deux aimants ensemble, on nomme *pôles amis* ceux qui portent différents noms, et *pôles ennemis* ceux du même nom; cette propriété est très remarquable lorsqu'on approche deux aimants l'un de l'autre, car alors on verra non seulement que les pôles de différents noms s'attirent mutuellement, c'est-à-dire le boréal de l'un et le méridional de l'autre, mais aussi que les pôles du même nom se fuient et se repoussent l'un de l'autre. On le voit encore plus distinctement lorsqu'on approche deux aiguilles aimantées l'une de l'autre.

Les pôles de même nom se repoussent, les pôles de nom contraire s'attirent.

1972. On peut, à l'aide d'une balle de fer suspendue à un fil flexible (on nomme cet instrument *pendule magnétique*), démontrer que tout aimant a deux pôles et une ligne moyenne. Si on tient l'aimant à la même distance du pendule, on a bientôt reconnu que certains points de sa surface lui impriment une grande déviation, tandis que d'autres points ne produisent qu'une direction à peine sensible. C'est aux extrémités opposées ou pôles de l'aimant que se montre une action très vive et sur l'intervalle qui les sépare que l'on remarque le moindre effet, c'est le milieu de la longueur de l'aimant que l'on nomme *ligne neutre* ou *ligne moyenne*.

Pendule magnétique.

Ligne neutre des aimants.

1973. Si on brise un aimant suivant la ligne moyenne, il semble au premier abord que les deux portions qui en résultent doivent ne posséder qu'un pôle, mais on peut facilement prouver par l'expérience que chacune des deux parties est un aimant entier ayant ses deux pôles et sa ligne moyenne.

Un aimant brisé par sa ligne neutre acquiert deux nouveaux pôles.

1974. L'existence des deux pôles des aimants est un fait généralement admis et que l'expérience démontre, mais elle prouve également qu'il existe de chaque côté des deux moitiés d'un barreau aimanté de longue dimension, des alternatives de magnétisme contraire, et par suite réellement plus de deux pôles. On donne le nom de points conséquents à ces pôles intermédiaires; on peut les démontrer en présentant successivement le même pôle d'une aiguille aimantée librement suspendue, à tous les points d'un barreau aimanté maintenu constamment dans sa position verticale; toutes

Points conséquents.

Fig. 560.

les fois que l'on passe d'une attraction à une répulsion, on est assuré qu'il se trouve un point conséquent là où l'action est nulle. On peut encore déterminer ces points en plaçant sur le barreau une feuille de papier et projetant dessus de la limaille, comme nous l'avons dit (1970), le groupement de parcelles en certains points indique sur-le-champ la position des points conséquents.

§ III. *Aimantation par influence.*

Sous l'influence d'un aimant, le fer devient lui-même un aimant.

1975. Nous avons remarqué plus haut que les parcelles de limaille de fer qui se groupent aux extrémités d'un aimant se tiennent unies les unes aux autres et forment des filaments plus ou moins longs; ce phénomène indique donc cette propriété remarquable du fer doux de devenir lui-même un aimant capable d'agir sur les parcelles de fer qui l'environnent lorsqu'il est mis en contact avec un aimant.

Pour démontrer clairement cette propriété, on peut placer verticalement un barreau de fer, par l'un de ses bouts, très près de l'une des extrémités d'un barreau aimanté horizontal, et de présenter au bout libre du premier de la limaille de fer; celle-ci s'y attache aussitôt et y reste suspendue tant que l'action par influence subsiste; mais aussitôt qu'elle cesse, lorsqu'on enlève l'aimant, la limaille retombe. Au lieu de limaille, on peut employer de petits cylindres de fer doux, que l'on fait adhérer les uns aux autres au moyen de l'action par influence. Vient-on à retirer l'aimant, les cylindres restent sans action les uns sur les autres et retombent aussitôt.

Quand un aimant agit par influence, il ne perd rien de son magnétisme. On peut facilement démontrer qu'un barreau aimanté ne perd rien de sa puissance attractive, quel que soit le nombre de barreaux de fer qu'il ait servi à aimanter; son énergie peut même successivement s'accroître dans de certaines limites. Réaumur a remarqué qu'un aimant acquérait une force beaucoup plus grande quand il était en contact avec une enclume; et d'un autre côté, le fer doux rentrant dans l'état naturel dès l'instant qu'il n'est plus sous l'influence de l'aimant, doit posséder en lui-même

les principes propres à développer en lui la vertu magnétique puisqu'il ne prend rien à l'aimant.

1976. Un barreau de fer doux aimanté par influence rentre, comme nous venons de le dire, dans l'état naturel aussitôt que l'on retire l'aimant; avec des barreaux d'acier trempé ou de fer écroui les phénomènes sont tout différents. L'action par influence est beaucoup plus lente à se manifester, mais aussi quand elle est développée elle y persévère pendant long-temps, même alors que les barreaux ne sont plus sous l'influence de l'aimant; le barreau est *alors aimanté*, c'est un aimant artificiel.

Différence qui existe entre le fer doux et l'acier trempé, relativement au magnétisme.

Pour expliquer cette très remarquable différence, on admet qu'il existe dans l'acier une cause qui s'oppose à la décomposition du magnétisme naturel et à la recomposition des deux fluides quand ils sont séparés, laquelle a de l'analogie avec celle qui s'oppose également, comme nous le verrons dans le livre suivant, à la décomposition de l'électricité par influence dans les corps mauvais conducteurs. On attribue cette cause à l'action d'une force coërcitive qui résulte, soit de l'arrangement des molécules, soit de l'interposition entre elles de molécules étrangères. Cette force varie dans les différentes espèces d'acier, elle varie encore d'une manière très sensible dans le même acier suivant la trempe; plus la trempe est dure, plus la force coërcitive est puissante.

Force coërcitive.

1977. On voit, d'après ce qui précède, que nous pouvons fabriquer à volonté des aimants ayant les mêmes propriétés magnétiques que les aimants naturels. Nous verrons, dans un chapitre spécial, comment il faudra nous y prendre pour donner la plus grande puissance possible aux aimants artificiels; disons seulement, dès à présent, qu'ils prennent différents noms suivant leur forme et les usages auxquels on les destine.

L'aiguille aimantée a, en général, la forme d'une losange; elle est destinée, tantôt à être suspendue par un fil de soie, tantôt à être posée sur un pivot d'acier très aigu au moyen d'une chape en agate *c*.

Aiguille aimantee. Fig. 561.

On donne le nom de *barreau aimanté* à une aiguille de grande dimension. La réunion de plusieurs aiguilles aimantées ou de plusieurs barreaux ayant tous les pôles de même

Barreau aimanté. Faisceau magnétique.

nom tournés dans le même sens, forme un *faisceau magnétique* ou un faisceau aimanté.

§ IV. *Propriétés diverses des aimants.*

La propriété magnétique ne change ni les dimensions ni le poids des corps.

1978. La propriété magnétique ne change ni la dimension, ni le poids des corps. M. Gay-Lussac ayant aimanté un cylindre d'acier rempli d'eau, auquel il avait adapté un petit tube capillaire gradué, n'a observé aucun changement dans la hauteur du liquide.

Les aimants n'ont pas besoin d'être isolés.

1979. Les aimants, pour conserver leurs propriétés magnétiques, n'ont pas besoin d'être isolés; le contact des substances étrangères qui n'ont point d'action chimique sur eux ne leur font perdre aucune de leurs propriétés; les barreaux aimantés exposés à une température très élevée perdent tout leur pouvoir magnétique et deviennent même insensibles à l'action des aimants.

Des substances de nature très diverse sont sensibles au magnétisme. Expériences de Coulomb.

1980. Coulomb, qui a enrichi l'histoire du magnétisme de tant de faits d'une si grande importance, a fait beaucoup d'expériences pour reconnaître si des substances de nature très diverse n'étaient pas sensibles au magnétisme; il fit osciller de petites aiguilles de bois, de verre, de gomme laque suspendues à des fils de soie sans torsion entre les pôles contraires de deux forts barreaux aimantés, en comparant les nombres d'oscillations faites par ces aiguilles sous l'influence des aimants, avec celles qu'elles faisaient dans le même temps en dehors de cette influence; il reconnut que des corps qu'on pourrait regarder comme exempts de fer devenaient cependant sensibles au magnétisme, mais ces actions étaient si faibles, que la moindre trace de fer dans ces substances suffisait pour les expliquer.

Expériences de Le Baillif. Sidéroscope.

Le Baillif a imaginé un appareil désigné sous le nom de sidéroscope, qui démontre que toutes les substances agissent sur l'aiguille aimantée. Cet appareil se compose d'une paille de trois décimètres de longueur environ, suspendue à un fil de cocon; trois aiguilles à coudre, aimantées à saturation, sont fixées horizontalement, l'une dans l'axe de la paille à l'une de ces extrémités, les deux autres perpendiculairement à cet axe vers la seconde extrémité, de telle manière que leurs pôles contraires se regardent. La première aiguille

rend l'appareil sensible à l'action du globe, en sorte que la paille se place dans le méridien magnétique. Le tout est entouré d'une cage de verre, percée latéralement d'un trou par lequel on présente à l'aiguille les corps que l'on éprouve; un arc divisé, maintenu au-dessus de la paille, sert à mesurer ses déviations. Lorsqu'on présente différents corps à l'aiguille, elle est tantôt attirée, tantôt repoussée; le bismuth et l'antimoine produisent tous les deux une répulsion; mais ces effets sont toujours très petits, malgré la grande sensibilité de l'appareil.

Expériences de M. Becquerel.

M. Becquerel a également prouvé que des aiguilles de bois ou de verre, suspendues à des fils de cocon, tendent à prendre une direction déterminée lorsqu'elles sont placées dans le voisinage de pôles contraires de deux forts barreaux aimantés. Il a remarqué que cette direction varie avec les distances de chaque aiguille aux pôles des barreaux, à égale distance de ces pôles sur la ligne qui les unit, les aiguilles éprouvées semblent se diriger à l'axe commun des aimants. Mais il faut le dire, les effets précédents sont très faibles, et il faut une grande délicatesse d'expérimentation pour les voir se manifester.

§ V. *Sources d'aimantation.*

1981. Le pouvoir magnétique peut être développé dans le fer ou l'acier par des causes très diverses : nous citerons l'*action du globe*, le *contact avec un aimant*, la *torsion*, la *percussion*, le *choc*, *plusieurs actions chimiques*, *etc.* Le fer qui a séjourné dans le sein de la terre, un barreau d'acier qui a été pendant long-temps dans la direction du méridien, finissent par s'aimanter.

On aimante artificiellement un barreau d'acier, en faisant des frictions à sa surface avec un aimant. Nous développerons plus loin ce procédé.

On aimante encore un barreau, en l'échauffant et en le refroidissant ensuite entre deux aimants; ou en le frottant à différentes reprises dans le sens de sa longueur; quelquefois la propriété magnétique se développe par une simple chute sur un corps dur. Un fil de fer tordu et cassé présente aussi le phénomène de l'aimantation.



Une forte décharge électrique ou bien une suite de petites étincelles, en passant à travers une aiguille, lui communiquent la vertu magnétique; les courants de la pile voltaïque produisent des effets semblables.

Configliachi et Morichini à Rome, et miss Somerville en Angleterre, disent avoir aimanté des aiguilles par l'action de la lumière et surtout des rayons violets; mais M. Pouillet n'a pu en aucune façon vérifier la réalité de cette expérience.

Diverses substances magnétiques.

1982. Plusieurs composés ferrugineux présentent des traces de magnétisme d'autant plus sensibles que le fer y entre en plus grande proportion, mais il en est qui n'en offrent plus aucune trace; ainsi le peroxyde, le persulfure de fer ne sont plus magnétiques à la manière du fer, de l'acier ou de l'aimant. Le nickel, le cobalt, le chrome et le manganèse sont les seuls corps élémentaires qui jouissent avec le fer de la propriété d'être magnétiques, mais cette propriété ne se retrouve plus dans la plupart des composés chimiques dont ils font partie.

§ VI. *Hypothèse de deux fluides magnétiques.*

Supposition de l'existence d'un fluide magnétique. — Expériences sur lesquelles elle s'appuie.

1983. Pour expliquer les phénomènes magnétiques on admet généralement deux fluides doués de propriétés contraires qui résident autour des molécules du fer, sans pouvoir passer d'une molécule à une autre, et dont la réunion forme le fluide magnétique naturel. De même que nous verrons plus loin que dans la théorie de l'électricité on admet deux fluides différents, qui se neutralisent l'un l'autre pour former du fluide électrique naturel; de même aussi on pense que le fluide magnétique naturel se compose de deux fluides dont les molécules de chacun d'eux se repoussent, tandis qu'elles attirent celles de l'autre fluide. Cette hypothèse s'appuie sur les expériences d'attractions et de répulsions magnétiques et sur l'existence de deux pôles (1970, 1971). Nous discuterons plus tard les différentes théories physiques qui ont été données pour expliquer la cause des phénomènes magnétiques.

CHAPITRE II.

DES PROCÉDÉS D'AIMANTATION ET DES AIMANTS ARTIFICIELS.

§ I. *Aimantation par les aimants.*

1984. Nous avons vu précédemment que le fer prenait sous l'influence d'un aimant une force magnétique qui s'évanouit presque immédiatement dès lors qu'on l'éloigne de l'aimant; l'acier ne ressent pas aussi promptement que le fer l'influence magnétique, il faut des opérations plus puissantes pour lui communiquer des propriétés magnétiques; mais aussi les conserve-t-il beaucoup plus long-temps en vertu de son pouvoir coërcitif. Pour atteindre ce but on a recours à l'attouchement et au frottement. Voici les procédés les plus anciens qu'on employait pour aimanter l'aiguille de boussoles. On posait l'aiguille *a b c* sur une table, et on passait le pôle B de l'aimant par-dessus de *b* vers *a*, et étant parvenu au bout *a*, on levait l'aimant bien haut, et on le ramenait par l'air en *b*; on répétait cette opération plusieurs fois de suite, et on prenait toujours bien garde que l'autre pôle de l'aimant n'approchât point de l'aiguille, puisqu'il y gâterait tout. Après avoir passé quelquefois le pôle *b* de l'aimant sur l'aiguille de *b* en *a*, on verra que l'aiguille est devenue magnétique et que le bout *b* sera le pôle du même nom que celui de l'aimant dont on a frotté. Donc si l'on veut que le bout *b* devienne le pôle boréal, en frottant avec le pôle boréal de l'aimant, il faut passer de *b* vers *a*; mais si l'on voulait frotter avec le pôle méridional de l'aimant, il faudrait l'appliquer au bout *a*, et le passer au bout *b*. Cette manière de frotter ou toucher est nommée à *la simple touche*, puisqu'on ne touche que d'un seul pôle; mais elle est fort défectueuse, et ne communique à l'aiguille que peu de force, l'aimant fût-il même d'une grande puissance; aussi ne réussit-elle pas lorsque l'acier est porté au plus haut degré de dureté par une

Procédés d'aimantation.

Fig. 562.

De la simple touche.

trempe très forte, ce qui serait pourtant l'état le plus propre pour la conservation du magnétisme.

Aimantation par contact. 1985. Knight fit connaître en 1745 un perfectionnement dans le mode d'aimantation par le simple contact. Il plaça bout à bout par des pôles de nom contraire deux barreaux fortement aimantés; il posait dessus dans le sens de leur longueur un petit barreau d'acier trempé, de manière que son milieu correspondait aux points de jonction des deux barreaux; puis il séparait ceux-ci en les faisant glisser dans un sens opposé jusqu'aux extrémités du petit barreau, qui se trouvait avoir acquis un magnétisme plus fort que celui qu'on lui communiquait par la méthode précédente; on aimante ainsi à saturation des barreaux courts et peu épais.

Procédé de Duhamel, ou de la touche séparée. Fig. 563. 1986. Duhamel et Antheaume trouvèrent bientôt un procédé d'une grande perfection. On place parallèlement l'un à l'autre deux barreaux A B et A' B' joints à leurs deux extrémités par deux petits parallélipipèdes de fer doux F et F'; puis l'on prend deux barreaux aimantés *a b* et *ab'*, que l'on incline de 25 à 30° sur leur direction, en les posant d'abord au milieu de l'un d'eux, les pôles inverses en regard, et on les fait glisser un certain nombre de fois en sens contraire, jusqu'à l'extrémité du barreau. On fait la même opération sur l'autre.

L'application des petits morceaux de fer doux à l'extrémité des barreaux que l'on aimante est un perfectionnement important; en effet, dès que ces barreaux ont acquis un certain degré de magnétisme, les parallélipipèdes de fer doux s'aimantent par influence et réagissent ensuite sur les barreaux pour augmenter leur magnétisme.

En substituant deux aimants aux barreaux de fer doux, on devait encore accroître le développement du magnétisme; c'est ce qu'a fait Æpinus; néanmoins la méthode de Duhamel est excellente pour aimanter les aiguilles de boussole et les lames qui n'ont que quelques millimètres d'épaisseur.

Procédé de la double touche, ou d'Æpinius. 1987. Mitchell a inventé un moyen d'aimantation qui a été nommé procédé de la double touche; il a été perfectionné depuis par Æpinius, et il est encore connu sous le nom de *Procédé d'Æpinius*. On prend deux barreaux fortement aimantés, liés parallèlement entre eux et les pôles inverses en regard et à une distance de 7 à 8 millimètres l'un de l'autre.

Après avoir placé en contact plusieurs barreaux égaux, on fait glisser le double barreau à angles droits par une de ses extrémités tout le long de cette ligne; les barreaux intermédiaires acquièrent ainsi une grande puissance magnétique. Pour être certain que le développement du magnétisme est le même au signe près, dans chacune des deux moitiés, il faut avoir soin d'appliquer le double barreau au centre de celui que l'on veut aimanter et de faire sur chacune des deux moitiés un nombre égal de frictions. Quand les barreaux sont revenus au centre, on les enlève perpendiculairement pour ne pas changer l'effet primitivement produit.

La modification d'Æpinius à la méthode de la double touche consiste à maintenir les deux barreaux glissant toujours parallèlement l'un à l'autre et inclinés en sens contraire.

AEpinius a trouvé qu'une inclinaison de 15 à 20 degrés donne sensiblement le maximum d'effets; en y joignant, comme il l'a fait, l'emploi des barreaux de fer doux ou des aimants, on a un procédé qui a de l'avantage sur les autres, de pouvoir aimanter fortement de gros barreaux avec des barreaux faibles en magnétisme. Fig. 564.

Cette méthode a l'inconvénient de ne pas produire un développement égal de magnétisme dans chacune des moitiés du barreau, et de faire naître plus facilement des points conséquents dans des barreaux d'une certaine longueur que la méthode de Duhamel : aussi ne doit-on pas aimanter par ce procédé des aiguilles de boussoles; on ne s'en sert ordinairement que pour les gros barreaux, auxquels on veut donner un fort degré de magnétisme, sans qu'il soit nécessaire d'avoir une distribution égale de magnétisme.

1988. En prenant dans les procédés de Duhamel et de Mitchell ce qu'ils ont de plus avantageux, et en apportant dans l'exécution toutes les connaissances qui peuvent résulter d'une longue pratique, Coulomb s'est arrêté aux dispositions suivantes pour former les faisceaux magnétiques; il emploie, dans chacun, dix barreaux d'acier trempés cerise clair, ayant 5 ou 6 décimètres de longueur, 15 millimètres de largeur, et 5 d'épaisseur. Il les aimante d'abord autant qu'il le peut avec un aimant naturel ou artificiel; puis, les réunissant par leur pôle de même nom, il en forme deux couches; de 5 bar- Procédé de Coulomb. Fig. 565.

reaux chacune, séparées par de petits parallélipipèdes rectangles de fer très doux; qui leur servent comme d'armure commune et qui saillent un peu au-delà de leurs extrémités.

1989. M. Biot a trouvé que l'on pouvait avec avantage substituer à ces parallélipipèdes des lames de fer doux, qui se réunissent à l'extrémité des aimants en une masse commune, terminé par une pyramide tronquée. Cette disposition, qui fait mieux conspirer les forces, est représentée fig. 566.

Fig. 566.

Saturation magnétique.

1990. La quantité de magnétisme que prend un corps susceptible d'être magnétisé va croissant avec la force des barreaux qui servent à l'aimanter, mais la quantité de magnétisme qu'il conserve est susceptible d'une limite qu'on appelle *point de saturation*. Les corps sursaturés ne retombent pas immédiatement au point de saturation. M. Pouillet a vu qu'il n'est pas rare après quelques mois de les voir éprouver encore quelques légères variations. On reconnaît qu'une aiguille est aimantée à saturation en la réaimantant dans le même sens avec des barreaux plus puissants que ceux qui l'ont aimantée la première fois; si elle ne prend qu'une faible augmentation qu'elle perd ensuite avec le temps, on sera alors certain qu'elle était aimantée à saturation.

Influence de la trempe sur la force coërcitive.

1991. Nous avons vu précédemment en quoi différaient sous les points de vue la force coërcitive (1976) le fer et l'acier : ce dernier corps diffère encore beaucoup de lui-même, suivant les divers degrés de trempe. On a constaté par des expériences précises que les lames d'acier qui ont reçu la trempe plus dure sont douées de la plus grande force coërcitive, et sont par conséquent susceptibles de prendre la plus grande intensité magnétique lorsqu'on les aimante avec des barreaux assez puissants; que les lames recuites au bleu des ressorts conservent encore assez de force coërcitive pour prendre un grand pouvoir magnétique. Or, comme l'acier qui a reçu la trempe la plus dure est cassant comme du verre, il est préférable de recuire les aiguilles jusqu'au bleu, puisque par cette pratique on perd très peu en puissance magnétique et qu'on évite ainsi d'avoir des instruments extrêmement cassants.

De la diminution du pouvoir magnétique dans

1992. Les lames et les barreaux aimantés peuvent être disposés de différentes manières à l'égard de la force terrestre, et cette force dans des circonstances favorables peut détermi-

ner une recomposition partielle des fluides. Par exemple, dans nos climats, un barreau qui serait tenu verticalement, son pôle boréal en bas, éprouverait une dimunition magnétique, et si, dans cette position, il recevait quelques chocs ou quelques coups de marteau, il pourrait en peu de temps être réduit à une force très faible ou même prendre des pôles contraires.

les barreaux aimantés.

1993. Pour conserver intact le pouvoir magnétique, on emploie des armatures. On appelle armure ou armature des morceaux de fer très doux que l'on applique sur les surfaces polaires de l'aimant, et qui, devenant eux-mêmes magnétiques par influence, augmentent avec le temps son énergie. Les aiguilles libres se trouvent toujours placées en vertu de leur force directrice de manière que l'action de la terre agit pour y déterminer une plus grande énergie; aussi cette action leur tient-elle lieu d'armature.

Conservation du pouvoir magnétique. Armatures.

Un phénomène très remarquable que présentent les aimants et qui se rapporte aux armatures est le suivant : Supposons qu'à l'un des pôles d'un aimant naturel ou artificiel on applique un morceau de fer doux qui s'y attache, et auquel soit suspendu un petit plateau de balance dans lequel on puisse placer successivement différents poids. Si l'on met d'abord dans ce plateau toute la charge que l'aimant peut soutenir, et qu'on laisse le contact établi, on trouvera qu'on peut de jour en jour augmenter cette charge d'une petite quantité. Mais si au bout de quelques mois on détache avec effort le morceau de fer, et qu'on essaie aussitôt de le remettre avec toute sa charge, on trouve que l'aimant n'est plus capable de la soutenir; il a perdu instantanément tout l'excès de force qu'il avait acquis par l'influence du fer.

On met également des armatures aux aimants naturels non seulement pour augmenter la force magnétique des pôles, mais encore pour donner au magnétisme de la masse une meilleure direction. On a représenté dans la figure (567) un aimant naturel armé; l et l' sont les ailes de l'armature p et p' en sont les pieds. On donne aux ailes une largeur égale à celle de l'aimant et une épaisseur d'environ 3 millim. Les dimensions des pieds dépendent de la force de l'aimant.

Armatures des aimants naturels. Fig. 567.

1994. On donne le nom de faisceaux magnétiques à des barreaux aimantés réunis parallèlement et par les pôles du

Fabrication des faisceaux magnétiques.

même nom. Lorsqu'on aimante séparément les barreaux et qu'on les réunit pour en former un faisceau, on n'obtient point un effet égal à la somme des effets que produiraient les barreaux séparément, parce què les pôles voisins exercent les uns sur les autres une action réciproque qui les affaiblit. Les lames centrales éprouvent une diminution de magnétisme, et l'effet magnétique d'un faisceau de barreaux paraît être le même d'après les expériences de Coulomb et de Nobili que celui d'une masse continue de même dimension. Quand on forme des faisceaux il est très avantageux de les disposer en retraite à partir du centre, de manière à former aux extrémités des cônes saillants ou rentrants, car alors les actions des barreaux tendent à augmenter leur puissance magnétique. On donne différentes formes aux faisceaux magnétiques. La figure (568) représente un faisceau construit d'après la méthode de Coulomb. Il est formé de trois couches renfermant chacune cinq lames; elles sont assujetties dans des pièces de fer qui servent d'armature. La figure (569) représente un faisceau magnétique en fer à cheval. Les lames, après avoir été trempées et aimantées, sont appliquées les unes sur les autres et maintenues par des bandes. C'est une forme qu'on donne très communément aux faisceaux aimantés. Un anneau $n\, n'$ sert à suspendre l'aimant, et une pièce de fer doux $p\, p'$, qu'on appelle le *portant* ou le *contact*, reste toujours en prise avec les deux pôles contraires *a* et *b*. Le portant n'a en général que le tiers de l'épaisseur de l'aimant, et il est légèrement arrondi sur sa surface de contact, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que par une seule ligne. Les aimants bien faits peuvent soutenir, au moyen du portant, jusqu'à dix ou vingt fois leur poids.

(Marginal notes: Fig. 568. Fig. 569.)

Aimantation partielle des plaques d'acier. Figures magnétiques. 1995. M. Haldat a remarqué qu'on pouvait aimanter partiellement des lames d'acier, suivant des contours quelconques. Il prend des plaques de tôle ou d'acier de 21 à 27 centim. carrés et de 2 à 3 millim. d'épaisseur, et il trace sur leur surface avec un aimant assez fort des figures qu'il rend apparentes, en répandant du fer porphyrisé avec un tamis sur la face aimantée de la plaque.

§ II. *Aimantation par l'action de la terre.*

Aimantation instable. 1996. La terre agit continuellement par influence sur les

matières susceptibles de devenir magnétiques ; cette force tend continuellement à les aimanter ; mais elle ne produit un effet sensible que sur les corps qui n'ont qu'une force coërcitive très faible, comme le fer doux. Si on prend une barre de fer de 1/2 mètre à 1 mètre de longueur, si on la place dans la direction du magnétisme terrestre, ou seulement verticalement, elle prend un pôle austral à la partie supérieure et un pôle boréal à la partie inférieure. Si on fait tourner la barre vers son milieu, l'intensité des pôles s'affaiblit à mesure qu'elle se rapproche d'une position perpendiculaire à sa première direction ; tout indice de polarité disparaît, puis si on continue le mouvement les pôles reparaissent, mais en sens contraire. Ainsi tous les corps magnétisables deviennent sous l'influence du globe de véritables aimants instables ; mais si par un moyen quelconque on peut leur communiquer la force coërcitive leur polarité subsiste malgré leurs changements de position. Ce pouvoir coërcitif, ils peuvent l'acquérir par plusieurs actions mécaniques ; par la percussion, la vibration, la torsion, l'action de la lime, etc.

Aimantation à saturation des barreaux d'acier par l'action de la terre.

1997. Gilbert avait remarqué en 1600 que le fer devient magnétique quand on le frappe à coups de marteau dans la direction nord et sud du méridien magnétique. On trouve dans la plupart des ouvrages de physique que dans les ateliers où l'on travaille le fer presque tous les outils jouissent de propriétés magnétiques très prononcées. M. le duc de Luynes a vérifié l'exactitude de cette observation, mais seulement pour les outils fabriqués avec de l'acier fondu ; ceux qui sont faits avec de l'acier de cémentation ne présentent point de propriétés magnétiques évidentes.

M. Scoresby a appliqué à la formation des aimants les propriétés magnétiques qu'il a reconnues dans l'acier soumis à percussion. Il prit deux barres d'acier doux, longues de 71 centim. et larges de 2 centim. ; six autres barres plates d'acier doux, longues de 21 centim. et larges de 1 centim. ; et une large barre de fer doux : toutes ces barres n'avaient aucune trace d'aimantation. La large barre de fer fut d'abord frappée dans une position verticale : on la posa immédiatement, sans changer sa direction, sur les barres d'acier qu'on frappait : elles furent aussi frappées l'une sur l'autre. Chacune des petites barres, suspendue aussi verticalement au

sommet d'une des larges barres d'acier, fut frappée successivement, et en quelques minutes elles avaient acquis un pouvoir considérable de suspension. Deux des plus petites barres, unies par deux petits parallélipipèdes de fer doux, furent frottées avec les quatre autres barres de la manière indiquée par Mitchell; elles furent remplacées par deux autres, et celles-ci par les deux dernières. Après avoir ainsi traité chaque paire de lame pendant un certain temps et en les changeant, après les avoir frottées pendant une minute environ, on trouva à la fin que toutes les barres étaient aimantées à saturation.

Voilà donc un excellent procédé pour se procurer des aimants très puissants sans le secours d'un autre aimant.

Le fer en s'oxidant prend des propriétés magnétiques.

1998. J. César, chirurgien à Rimini, remarqua le premier en 1590 que les barres de fer qui sont exposées à l'air dans une position verticale et qui y sont oxidées se convertissent en de véritables aimants. Gassindi confirma cette remarque en 1630. Il reconnut que la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix qui était tombée de vétusté possédait toutes les propriétés d'un aimant.

Aimantation par les courants électriques.

1999. L'électricité est une cause puissante du développement du magnétisme; c'est la découverte de cette action qui a donné naissance à l'électro-magnétisme, branche nouvelle, mais déjà importante de la physique, que nous aborderons après avoir étudié l'électricité.

CHAPITRE III.

DES LOIS DU MAGNÉTISME.

§ I. *Loi des attractions et des répulsions magnétiques.*

2000. Nous avons exposé précédemment les principaux phénomènes relatifs aux attractions et aux répulsions magnétiques (1970). Nous allons maintenant nous occuper de la loi suivant laquelle elles s'exercent. C'est Coulomb qui a fait

tant de travaux remarquables sur le magnétisme qui l'a démontrée expérimentalement. En voici l'énoncé : *Les attractions et les répulsions magnétiques sont en raison inverse du carré de la distance*. Coulomb, pour démontrer cette loi, a employé deux méthodes, 1° la balance magnétique; 2° la méthode des oscillations.

La description de la balance de torsion a déjà été donnée précédemment (253). Nous allons ajouter quelques nouveaux détails. On prend une boîte carrée de 97 cent. de côté et de 68 cent. de hauteur, dont les planches sont jointes par des chevilles de bois; à 24 cent. au-dessus du fond est placé un cercle horizontal de bois ou de cuivre, de 92 cent. de diamètre divisé en degrés. Sur la boîte est placée une traverse A B, qui porte à son milieu une tige creuse *cd*, de 81 cent. de longueur, terminée en *d* par un micromètre de torsion. La pince de ce micromètre saisit l'extrémité supérieure d'un fil de cuivre jaune à l'autre extrémité duquel est adapté un anneau de cuivre destiné à porter l'aiguille d'acier. Balance magnétique. Fig. 570.

Avant de commencer l'expérience, on voit si, lorsque la torsion du fil est nulle, l'aiguille aimantée se place naturellement dans le méridien magnétique; on s'en assure en substituant à cette aiguille une autre aiguille de cuivre de même dimension que l'autre, qui reste dans le plan du méridien magnétique en vertu de la force de torsion du fil. On place la boîte de manière que la direction du méridien magnétique communique aux divisions zéro et 180 du cercle horizontal. Pour donner une idée exacte de la manière de conduire ces observations, nous allons donner les résultats que Coulomb a obtenus dans une de ses expériences.

Coulomb ayant aimanté un fil d'acier de 65 cent. de long et d'une ligne et demie de diamètre, il le suspendit horizontalement dans la balance, et chercha d'abord la force en vertu de laquelle la terre le ramenait dans le méridien. Il trouva qu'en tordant le fil de suspension de deux circonférences moins 20 degrés, l'aiguille s'arrêtait à 20 degrés du méridien magnétique, de sorte que pour les angles de 20 à 24 degrés, dont les sinus sont à peu près proportionnels aux arcs, il fallait, pour éloigner l'aiguille d'un degré de son méridien magnétique, une force de torsion à peu près égale à

35 degrés. Il plaça ensuite verticalement dans le méridien magnétique un autre fil aimanté, ayant les mêmes dimensions, à 30 cent. du centre de suspension de la première aiguille, de manière que l'extrémité boréale de ce fil se trouvât à environ 2 cent. 7 m. au-dessous du niveau de l'extrémité boréale de l'aiguille suspendue. L'aiguille horizontale fut chassée du méridien magnétique, et ne s'arrêta que lorsque la force de répulsion des pôles opposés fut en équilibre avec la force directrice du globe. Ayant tordu le fil de suspension, il obtint les résultats suivants :

1er essai. L'aiguille horizontale ayant été chassée, s'est arrêtée à 24 degrés du méridien magnétique, sans qu'on tordît le fil.

2e essai. Pour ramener l'aiguille à 17 degrés, il tordit le fil de suspension de 3 circonférences.

3e essai. Pour la ramener à 12 degrés, il fut obligé de tordre de 8 circonférences ; or, lorsque l'aiguille était sollicitée seulement par l'action du magnétisme terrestre, elle était maintenue à 20 degrés de son méridien par une force de torsion égale à 2 circonférences moins 20 degrés. Ainsi, dans le cas où l'aiguille formait un angle de 20 degrés avec son méridien, la force qui la sollicitait était de 700 degrés. Mais comme dans le premier essai elle s'est arrêtée à 24 degrés, elle y a été ramenée par une force de 849 degrés ; en outre la répulsion des aiguilles avait tordu le fil de suspension de 24 degrés : il en résulte que la répulsion totale était de 864. En raisonnant de même, il trouva que, dans le second essai, l'action des deux pôles de l'aiguille était mesurée par 1.692, et dans le troisième essai par 3.312 degrés. Ainsi, pour les distances 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes étaient comme 864, 1.692, 3.312, ou bien comme les nombres 1/4, 1/2, 1 ; c'est-à-dire en raison inverse du carré des distances ; il est donc bien démontré par ces expériences aussi délicates que bien conduites que les attractions et répulsions magnétiques suivent la loi qui régit les attractions planétaires que nous avons énoncée en commençant cet article.

2001. La loi des attractions et des répulsions magnétiques peut encore être vérifiée par la méthode des oscillations que nous allons exposer en parlant de la mesure des forces magnétiques.

§ II. *Mesure des forces magnétiques.*

2002. Les physiciens se contentèrent long-temps, pour déterminer l'énergie des aimants, de mettre en contact avec l'une des extrémités du barreau aimanté qu'on voulait examiner, un morceau de fer doux que l'on chargeait petit à petit de poids jusqu'à ce qu'il se détachât. Le poids absolu de ce morceau de fer ainsi chargé déterminait la puissance de l'aimant. Mais on comprend sans peine qu'on ne pouvait arriver ainsi qu'à de grossières approximations. Ce fut Coulomb qui, en 1789, découvrit et exposa deux méthodes à l'aide desquelles on peut mesurer avec précision l'intensité des forces magnétiques. L'une est celle des oscillations, qu'on emploie aussi pour déterminer l'intensité magnétique de la terre; l'autre consiste à comparer l'action magnétique à la force de torsion du fil de la balance dite de torsion (253 et 2,000).

La force magnétique des aiguilles peut être évaluée par la durée des oscillations qu'elles font à droite et à gauche de leur position d'équilibre, sous la seule influence du globe; l'énergie de leur magnétisme a pour mesure le carré du nombre des oscillations faites dans un temps donné, ou le rapport inverse du carré des temps employés à faire un même nombre d'oscillations.

Méthode des oscillations.

Une aiguille aimantée étant suspendue à un fil sans torsion, si on l'écarte du méridien magnétique, elle oscille autour de cette position, et l'intensité de la force qui la sollicite est proportionnelle, comme dans le pendule, au carré du nombre d'oscillations qu'elle exécute dans un temps donné.

Mesure des forces magnétiques dans une aiguille.

Soit o le nombre d'oscillations que cette aiguille exécute dans 10′, par exemple, sous l'influence de la force de la terre. Si par des moyens quelconques on a changé son intensité sans changer la position de ses pôles, et si l'on veut comparer ce second état au premier, il suffit de la suspendre de la même manière et de compter de nouveau le nombre o′ des oscillations qu'elle fait dans le même temps. Le rapport des deux intensités magnétiques m et m' sera donné par la proportion suivante $\frac{m}{m'} = \frac{o^2}{o'^2}$

Mesure des forces magnétiques dans un aimant de forme quelconque.

Pour comparer les divers degrés d'intensité magnétiques d'un aimant qui ne peut être suspendu pour osciller par lui-même, on a recours à un artifice. On le fait agir dans ses différents états magnétiques sur une petite aiguille d'épreuve, qui a été fortement trempée pour qu'elle ait une grande force coërcitive, afin que son magnétisme ne soit pas facilement décomposé par influence. On commence d'abord par faire osciller la petite aiguille d'épreuve sous la seule influence de la terre, puis enfin sous l'influence réunie de la terre et de l'aimant, qu'on a soin de placer dans le méridien magnétique; on déduit alors facilement des nombres d'oscillations faits dans le même temps, les rapports d'intensité du magnétisme de l'aimant. Puis, si on change son état magnétique, on recommence l'observation et on compare les deux résultats.

Loi des attractions et des répulsions magnétiques vérifiée par la méthode des oscillations.

2003. Nous avons dit précédemment (2001) que la méthode des oscillations peut servir à vérifier les lois des attractions et des répulsions magnétiques; il suffit pour cela de faire varier la distance du barreau aimanté, son intensité restant constante. Voici les expériences exécutées par Coulomb pour établir cette loi. Il suspendit une petite aiguille à un fil de soie et à l'abri des agitations de l'air; elle faisait 15 oscillations par minute. Il fit ensuite agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier fortement aimanté et maintenu verticalement dans le méridien magnétique de l'aiguille; l'extrémité du fil d'acier, qui agissait sur l'aiguille, s'abaissait de 2 cent. 3 m. environ au-dessous du plan horizontal de l'aiguille; cette disposition était nécessaire pour obtenir le maximum d'effet; le fil étant à 10 cent. de distance du centre de l'aiguille, elle fit 41 oscillations en 1 minute, et, le fil étant placé à 21 cent., le nombre des oscillations fut réduit à 24. Ainsi, à une distance double, l'intensité de la force est 4 fois plus petite; nouvelle preuve expérimentale de l'exactitude de la loi énoncée précédemment (2000).

Moments magnétiques des aiguilles aimantées.

2004. On peut encore employer la balance de Coulomb pour déterminer l'intensité de la force directrice sur des aiguilles aimantées de diverses dimensions. Coulomb donnait le nom de *moments magnétiques* à ces forces directrices qui varient dans chaque aiguille suivant la distance des pôles à l'axe de suspension et suivant l'énergie du magnétisme.

Pour mesurer les moments magnétiques de différentes aiguilles, on mesure la torsion qu'il faut donner au fil de suspension pour que les aiguilles éprouvent la même déviation. Les angles de torsion, qui produisent une même déviation, sont proportionnels à leurs moments magnétiques. Je vais indiquer les principaux résultats d'expériences entreprises par Coulomb dans le but d'étudier l'influence des dimensions et de la forme des aiguilles aimantées sur leurs forces directrices.

Pour des aiguilles cylindriques de même diamètre, mais de longueurs différentes, provenant d'un même fil d'acier ou de fer écroui par la torsion, les moments magnétiques ont diminué proportionnellement à la longueur, jusqu'à la limite d'un pouce environ; au-dessous de cette limite, la diminution était plus rapide et suivait à peu près celle du carré de la longueur. Des aiguilles cylindriques, ayant été réunies en faisceaux de grosseurs et de longueurs différentes, mais tels que leurs volumes fussent géométriquement semblables, les moments magnétiques de ces faisceaux, mesurés à la balance de torsion, étaient entre eux comme les cubes de leurs diamètres ou de leurs dimensions homologues.

Deux aiguilles de même longueur et de même poids ayant été taillées dans la même lame d'acier, de telle manière que l'une eût la forme d'un rectangle, et l'autre celle d'un parallélogramme oblique ou d'une double flèche; toutes les deux étant ensuite trempées au rouge obscur, et aimantées à saturation, le moment magnétique de la seconde aiguille a été trouvé plus grand d'un huitième environ que celui de la première.

§ III. *Distribution du magnétisme dans des aimants de différentes formes.*

2005. On peut avoir déjà une idée de la distribution du magnétisme dans un barreau aimanté, en le roulant dans de la limaille de fer (1970), et on remarque que les parcelles métalliques se fixent en des points déterminés, surtout aux extrémités. Mais cette expérience ne peut fournir que des indications générales; pour arriver à des déterminations précises, Coulomb a encore mis en usage les deux méthodes que nous avons indiquées. Voici les résultats principaux auxquels il est arrivé.

Distribution du magnétisme dans les barreaux et les aiguilles.

Fig. 571.

La force magnétique est nulle au milieu du barreau; elle croît très lentement jusqu'à une certaine distance, d'où elle augmente avec une très grande rapidité jusqu'aux extrémités. A distance égale du centre, les forces magnétiques sont égales, mais de nature contraire. La courbe *a b c b a'* indique la distribution du magnétisme dans une aiguille. L'intensité magnétique de chaque point est représentée par l'ordonnée qui passe par ce point. Pour des fils et des lames d'une longueur différente dont les dimensions transversales sont égales, mais très petites, relativement à la longueur, et qui sont régulièrement aimantées, la courbe qui représente les intensités magnétiques est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 16 ou 21 cent. Il résulte de là qu'au-dessus de 16 ou 21 cent., tous les aimants prismatiques d'une petite section ont leurs pôles à la même distance des extrémités; car les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière quand les composantes partielles suivent la même loi. Coulomb a fait voir que ces pôles se trouvent à 4 cent. des extrémités. Pour les aimants prismatiques très courts, les pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, en partant des extrémités; ce dernier résultat est une limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur de l'aimant diminue. D'après M. Becquerel, la distribution du magnétisme dans les fils d'acier très fins suit les mêmes lois. Quand l'aiguille n'est pas prismatique, les lois précédentes ne sont point applicables; dans les aiguilles en losanges les pôles se rapprochent du centre.

Situation des pôles pour les aimants prismatiques.

Distribution du magnétisme dans les aiguilles.

CHAPITRE IV.

THÉORIES PHYSIQUES DES AIMANTS.

2006. La théorie physique des aimants à laquelle on donne le nom de *magnétisme* a été long-temps considérée à part. Tant qu'aucun fait ne la rattachait à l'électricité, ses pro-

grès ont été bien incertains et de peu d'importance; c'était une nouvelle hypothèse substituée à une autre et qui n'avait qu'une valeur relative pour embrasser l'ensemble des faits. La découverte d'Œrsted de l'influence puissante que l'électricité en mouvement exerce sur les aimants, a indiqué la seule route à suivre pour remonter à l'origine du magnétisme et à l'action directrice du globe. Les découvertes d'Arago et de Faraday sont venues jeter de nouvelles lumières sur ces importantes relations que nous étudierons dans les livres subséquents; mais il est indispensable d'exposer ici la théorie des aimants dans l'état où elle se trouvait avant ces découvertes.

Théories de Thalès et d'Épicure.

Nous avons vu que les anciens connaissaient la propriété dont jouit l'aimant d'attirer le fer. Plusieurs philosophes de l'antiquité, Thalès, par exemple, pour expliquer ce fait extraordinaire, supposèrent une âme à l'aimant; d'autres, comme Épicure ou Plutarque, admirent, ou que les atomes de fer s'accrochaient à ceux de l'aimant, ou que l'aimant jouissait de la propriété de faire le vide dans lequel le fer se précipitait. On n'a pas manqué d'hypothèses plus absurdes les unes que les autres pour expliquer un phénomène aussi merveilleux. Enfin, Descartes, qui imprima une si vive impulsion aux différentes branches des connaissances humaines, ne pouvait manquer d'appliquer ses tourbillons à la théorie du magnétisme. Cette hypothèse, quoique ne reposant sur aucune base solide, régna cependant dans la science pendant plus d'un siècle, et trouva après ce laps de temps des hommes tels que de Bernouilli et Euler pour l'appuyer de preuves mathématiques.

Théorie de Descartes.

Théorie d'Æpinius.

2007. Æpinius donna une explication plus satisfaisante. Il essaya de prouver par le calcul que tous les phénomènes magnétiques connus alors pouvaient facilement s'expliquer au moyen des lois de l'attraction et de la répulsion. Après Æpinius, tout en conservant les principes qu'il avait admis, on adopta l'hypothèse de deux fluides différents. On dit que leur combinaison faisait l'état naturel; que leur séparation constituait l'état magnétique.

Théorie de Coulomb.

2008. Coulomb, qui a porté dans l'étude des phénomènes magnétiques la plus admirable sagacité expérimentale, posa les principes de la théorie physique du magnétisme. Il con-

serva l'hypothèse des deux fluides; mais il montra qu'ils ne peuvent éprouver dans les corps qu'un déplacement insensible. Il admet : 1° que le *volume apparent* d'une substance magnétique se trouve composé d'une multitude de petits espaces dans lesquels il y a du magnétisme, et d'une multitude d'autres petits espaces où le magnétisme n'existe pas ; 2° que les deux fluides contenus dans chaque petit espace magnétique peuvent être séparés quand la force qui les sollicite est capable de vaincre la force coërcitive; qu'ils peuvent s'arranger suivant les lois voulues par l'équilibre, mais qu'ils ne peuvent jamais sortir de la petite étendue dans laquelle ils ont été primitivement enfermés; tout ce qui les environne leur est impénétrable.

Les petits espaces où il se trouve du magnétisme s'appellent les *éléments magnétiques ;* les petits espaces où il ne s'en trouve pas s'appellent les *éléments non magnétiques*. La somme des éléments magnétiques et celle des éléments non magnétiques forment le volume apparent d'un corps.

Dans cette théorie il est un fait dont on se rend difficilement compte, c'est l'inégalité de l'action de deux barreaux de même volume extérieur, l'un de fer, et l'autre de nickel. Il semblerait au premier abord qu'une aiguille aimantée devrait développer dans ces deux barreaux une aimantation par influence d'égale intensité, d'où devraient naître des forces attractives égales; mais l'expérience démontre que l'action magnétique est beaucoup moins énergique sur le nickel que sur le fer. Poisson a démontré que ce résultat peut s'expliquer en admettant que le rapport des espaces vides et pleins de matière pondérable diffère d'un métal à l'autre, en sorte que le volume des parties réellement magnétiques peut être très différent sous un même volume de fer et de nickel. Lorsqu'on compare les densités des métaux avec les poids de leurs atomes, on trouve que le fer et le nickel sont de tous les métaux ceux pour lesquels le rapport des espaces pleins et vides de matière pondérable est le plus grand, ou ceux dont les dernières particules sont les plus rapprochées; le manganèse viendrait ensuite dans la série des métaux ainsi rangés par ordre de porosité. Il semblerait, d'après cela, que la propriété dont jouissent ces trois métaux d'être sensibles, lorsqu'ils sont en repos, à l'action

magnétique, tient au plus grand rapprochement de leurs atomes ou à leur moindre porosité, ce qui expliquerait la diminution de l'énergie magnétique, lorsque la température augmente. On sait qu'un boulet de fer, à la température rouge, n'agit plus sur l'aiguille aimantée. Mais, il faut l'avouer, l'hypothèse précédente rencontre encore de nombreuses difficultés. M. Poisson, en prenant pour point de départ la théorie de Coulomb et en supposant que dans leur séparation les fluides magnétiques ne parcourent qu'un espace infiniment petit, est parvenu à trouver les conditions d'équilibre des fluides magnétiques dans les aimants et les formules qui expriment leur action sur un point extérieur. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces théories; les calculs en sont trop élevés pour trouver place dans ce traité élémentaire; mais nous devons dire que les résultats que M. Poisson en a déduits ont été pleinement confirmés par l'expérience.

CHAPITRE V.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

§ I. *Notions générales.*

Action exercée sur un aimant par la terre.

2009. Nous avons dit précédemment qu'une aiguille aimantée, posée sur un pivot, n'est pas en équilibre dans toutes les positions; elle prend une direction déterminée vers un point de l'horizon, et si on l'en écarte elle tend toujours à y revenir par une série d'oscillations. Cette action de la terre sur les aiguilles aimantées se manifeste non seulement à sa surface, mais encore à de très grandes hauteurs dans l'atmosphère et à toutes les profondeurs auxquelles on soit parvenu. Cette action prouve que le globe de la terre est magnétique, et que c'est son action qui dirige l'aiguille aimantée. Euler prétend que la terre ne doit pas être regardée comme un très grand aimant; qu'elle agit par

les mines de fer et d'aimant qu'elle renferme dans son sein, et que leurs forces réunies fournissent la force générale qui produit tous les phénomènes du magnétisme terrestre. Mais les découvertes importantes, que nous exposerons plus loin, qui ont établi une relation intime entre les phénomènes magnétiques et les phénomènes électriques, prouvent évidemment que c'est à l'existence de courants électriques qu'on doit attribuer la puissance magnétique du globe.

Méridien magnétique. 2010. On donne le nom de *méridien magnétique* au plan qui passe par le centre de la terre et par la direction de l'aiguille horizontale, ou simplement, la trace que ferait ce plan sur la surface de la terre. Le méridien astronomique d'un lieu déterminé est le plan qui passe par ce lieu et par

Méridienne. l'axe de la terre : la *méridienne* est la trace de ce plan sur la surface de la terre.

Le méridien magnétique et le méridien astronomique sont deux plans verticaux, puisqu'ils passent l'un et l'autre par la verticale du lieu pour lequel on les considère ; mais ces deux plans peuvent faire entre eux un angle plus ou moins grand. *La déclinaison de l'aiguille aimantée* est dans chaque lieu l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que la direction de l'aiguille horizontale fait avec la méridienne. La déclinaison est orientale quand le pôle austral de l'aiguille passe à l'est de la méridienne, et occidentale quand il passe à l'ouest.

La déclinaison est actuellement occidentale ; elle est à Paris d'environ 22 degrés.

On donne le nom de *boussole de déclinaison* à l'appareil qui sert à observer la déclinaison.

L'*inclinaison* est l'angle que fait avec l'horizon une aiguille qui peut se mouvoir librement autour de son centre de gravité dans le plan vertical du méridien magnétique. A Paris, l'inclinaison est d'environ 70 degrés, et c'est le pôle austral qui plonge au-dessous de l'horizon. On donne le nom de *boussoles d'inclinaison* aux appareils propres à observer l'inclinaison.

2011. Dans la construction de tous les appareils qui servent aux observations magnétiques, si on excepte l'aiguille aimantée, qui en fait la partie principale, il ne faut employer que des substances totalement exemptes de fer ; l'observateur

doit prendre soin de ne porter sur lui aucun objet en fer, et il est bon d'opérer loin de toute habitation, dans un pavillon et dans une tente qui ne contiennent pas de fer.

§ II. *Déclinaison.*

2012. On prétend que les Chinois ont employé la boussole long-temps avant que cet instrument fût connu en Europe; on se fonde à cet égard sur les documents rapportés dans la description de la Chine par Duhalde, où il est dit qu'on se servait de la boussole pour voyager sur terre plus de mille ans avant J.-C. Le premier ouvrage qui parle de la boussole est attribué à un certain Guyot de Provins. Cet instrument était alors connu sous le nom de la *marinière*. En 1497, Vasco de Gama, navigateur portugais, fit usage de la boussole dans ses premières expéditions dans l'Inde; mais le nom de celui qui a fait cette grande découverte est encore ignoré. Boussole de déclinaison.

Dans les premiers temps, on pensait que la boussole se dirigeait toujours vers le nord; mais Colomb, en 1492, étant à la recherche du Nouveau Monde, observa que la direction n'était pas constante. Les plus anciennes observations un peu exactes sur la déclinaison commencèrent à Paris en 1550; à cette époque la déclinaison était vers l'est; elle est devenue nulle en 1663; puis elle est repassée à l'ouest, en augmentant successivement; depuis quelques années sa marche est décroissante.

Les boussoles sont constituées par une aiguille aimantée ayant la forme d'une losange; c'est Coulomb qui a montré que les aiguilles de cette forme, à poids égal, produisaient la plus grande force directrice. L'aiguille est garnie à son milieu d'une chape en matière dure; elle est montée sur un pivot et lestée sur sa partie sud, de manière qu'elle se tienne en équilibre horizontalement En plaçant dans le méridien géographique le diamètre qui passe par le zéro de la division, l'extrémité de l'aiguille indique la déclinaison. Fig. 571.

Les aiguilles de boussole doivent être extrêmement minces, parce que le frottement de la chape sur la pointe est proportionnel au poids de l'aiguille, et que l'intensité du magnétisme que peut acquérir une aiguille croît dans un plus petit rapport que son épaisseur. Si on suppose une ai-

guille horizontale ayant une largeur linéaire, sa direction sera celle des résultantes horizontales des actions du magnétisme terrestre; mais si nous supposons, ce qui existe toujours, que cette largeur soit très notable, alors il peut arriver que l'axe de la figure ne coïncide plus exactement avec ses résultantes. Pour vérifier ce fait il faut retourner l'aiguille, de manière que la face supérieure devienne la face inférieure; dans cette nouvelle position, l'aiguille sera déviée d'une quantité égale, mais opposée, de sorte qu'en prenant le milieu de l'arc, compris entre les extrémités de l'aiguille dans ces deux positions, on aura la mesure exacte de la déclinaison.

Fig. 573 représente la coupe de la boussole. Voici la description d'une boussole de déclinaison : gg' est l'aiguille, dd' un cercle divisé sur lequel on lit la division correspondante aux extrémités de l'aiguille ; bb' le bord de la boîte, qui est en cuivre rouge, comme tout le reste de l'appareil ; vv' le verre qui ferme la boîte pour éviter l'agitation de l'air; xy, un axe solide qui fait corps avec b, fond de la boîte, et qui peut tourner sur son extrémité conique inférieure dans une petite cavité de la vis vv. Cette rotation emporte l'axe, la boîte et toutes les pièces adhérentes; mais en même temps le pied de l'instrument reste fixe, ainsi que le cylindre ll' qui enveloppe l'axe xy et qui est destiné, au moyen de six rayons, tels que or et $o'r'$, à porter le cercle divisé zz' que l'on appelle *cercle azimutal*. Deux nonius, diamétralement opposés, dont l'un est représenté en n (fig. 574), sont fixés sur le bord de la boîte pour tourner avec elle, et pour marquer de quel angle elle tourne, soit en partant du zéro, soit en partant d'une division donnée du cercle azimutal. Les vis calantes vv' servent à rendre l'appareil horizontal, au moyen du niveau n'.

Fig. 574. tt' est une lunette : elle est portée sur un axe de rotation ee' parallèle au cercle des azimuts, et dont le milieu est dans la verticale du pivot. On remplit cette condition au moyen des petites vis qui terminent le montant m'. Dans son mouvement de rotation, la lunette emporte un nonius ss', qui parcourt l'arc divisé uu', et qui donne immédiatement l'angle du rayon visuel avec l'horizon.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on le dispose horizontalement, on fait tourner la boîte pour

amener dans le champ de la lunette un astre connu dont on observe la hauteur; en même temps on lit la division correspondante du cercle de l'aiguille et celle du cercle des azimuts, ce qui donne l'angle du méridien magnétique avec le vertical de l'astre au moment de l'observation. Il reste ensuite à trouver, par les méthodes astronomiques, l'angle vertical de l'astre avec le méridien du lieu pour en déduire la déclinaison.

2013. Chaque observation de déclinaison doit être répétée quatre fois, si l'on veut que le résultat soit corrigé de toutes erreurs. Après avoir fait une première observation, on retourne l'aiguille, de manière que les deux parties de son axe changent de supports et que ses deux faces soient substituées l'une à l'autre; on fait une seconde observation dans cette position; la moyenne entre les deux résultats se trouve corrigée de l'erreur provenant du non-parallélisme de l'axe magnétique de l'aiguille et de son axe de figure. On aimante ensuite l'aiguille en sens contraire, de manière à changer ses pôles de place. On écarte ainsi l'erreur dépendant de l'hétérogénéité possible de l'aiguille qui rendrait un de ses pôles plus fort que l'autre; puis on recommence deux autres observations semblables aux précédentes. La moyenne des résultats obtenus est l'observation corrigée.

2014. La boussole marine ou compas de variation est une boussole de déclinaison suspendue, de manière à se maintenir, au milieu de l'agitation de la mer, dans une situation sensiblement horizontale; sa construction repose d'ailleurs sur les mêmes principes.

Boussole marine.

2015. Wales, astronome attaché à l'expédition de Cook, signala le premier l'action qu'exercent sur la boussole les masses de fer souvent considérables qui entrent dans la construction des navires. On a trouvé que cette action pouvait causer une erreur qui s'élevait quelquefois de 15 à 20 degrés. C'est Barlow qui a étudié les moyens de la corriger.

Influence du fer qui entre dans la composition des vaisseaux sur la boussole. — Compensateur destiné à corriger cette influence.

Cette déviation de la boussole sous l'influence des grandes masses de fer peut être attribuée à trois causes : 1° à la décomposition du fluide magnétique qu'elle détermine dans les substances magnétiques qui l'environnent : cette cause ne produit que de faibles effets, on peut s'en garantir en plaçant la boussole à une grande distance des masses de fer du

navire ; 2° à l'état magnétique permanent que peuvent avoir ces substances d'après leur pouvoir coërcitif : si cette cause existait seule, on pourrait facilement en apprécier l'influence ; 3° à l'état magnétique variable que prennent ces substances sous l'influence du magnétisme terrestre. Cette cause est la plus puissante, et ses effets sont sans cesse variables ; il est bien difficile de s'en mettre rigoureusement à l'abri. M. Barlow a proposé à cet effet une ingénieuse méthode, mais qui ne donne encore que des approximations.

Les actions exercées sur la boussole par toutes les masses de fer, quels que soient leur nombre et leur distance, peuvent toujours être remplacées par un seul disque de fer doux. On détermine par tâtonnement pour chaque vaisseau la position exacte du disque de fer qui doit produire cet effet. Lorsque cette position est trouvée, voici comme on corrige les observations de la boussole : on observe la direction de l'aiguille, d'abord en éloignant le disque, et ensuite après l'avoir remis exactement à sa place. La déviation hors du méridien magnétique peut être regardée comme étant double, à la seconde observation, de ce qu'elle était à la première ; la comparaison des résultats fait donc connaître la déviation due au fer du vaisseau, et par conséquent la correction que doit subir la première observation.

Boussole de déclinaison absolue.

2016. Les appareils qui sont actuellement construits pour mesurer la déclinaison absolue sont beaucoup trop compliqués pour trouver leur description dans cet ouvrage élémentaire. On trouve dans le septième volume du *Traité de l'électricité et du magnétisme* de M. Becquerel, une description et des figures très exactes des instruments construits par M. Gambey.

Variations de la déclinaison suivant les lieux. — Lignes sans déclinaison.

2017. La déclinaison n'est pas la même sur toute la surface de la terre, elle varie d'un lieu à l'autre ; elle est orientale en Amérique et dans le nord de l'Asie, et occidentale en Europe. Il est des lieux où elle est nulle ; ces lieux paraissent former deux lignes irrégulières connues sous le nom de *lignes sans déclinaison*.

L'une de ces lignes a été reconnue dans le grand Océan, entre l'ancien et le nouveau monde ; elle coupe le méridien de Paris par 65 degrés de latitude australe, remonte au nord-ouest jusqu'au 35e degré de longitude, et devient pres-

que nord-sud en longeant les côtes du Brésil. La seconde ligne a pour point de départ le grand Archipel ; elle s'élève vers le nord et vient traverser la partie orientale de la Sibérie. Ces lignes sans déclinaison se déplacent ; elles sont douées d'un mouvement séculaire dirigé de l'est à l'ouest; ce déplacement paraît n'être pas uniforme dans toute l'étendue de ces lignes, puisque la déclinaison n'a pas sensiblement varié depuis 150 ans à la Nouvelle-Hollande.

En chaque lieu la déclinaison éprouve des variations qui paraissent dépendre du mouvement des lignes sans déclinaison.

Nous allons donner le tableau des changements que la déclinaison a éprouvés à Paris.

Déclinaisons observées à Paris.

ANNÉES.	DÉCLINAISONS.	ANNÉES.	DÉCLINAISONS.
1580.	11° 30′ E.	1816.	22° 25′ O.
1618.	8	1817.	22 19
1663.	0	1823.	22 23
1678.	1 30 O.	1824.	22 23
1700.	8 10	1825.	22 22
1780.	19 55	1827.	22 20
1785.	22 00	1828.	22 5
1805.	22 5	1829.	22 12
1813.	22 28	1832.	22 3
1814.	22 34	1835.	22 4

2018. Tous les jours l'aiguille de déclinaison éprouve des mouvements à l'est ou à l'ouest du méridien magnétique ; tantôt ces mouvements sont brusques et accidentels, on les nomme alors perturbations ; tantôt ils sont réguliers et périodiques, ils constituent alors les variations diurnes. Ce fut à la fin de 1722 que les variations diurnes furent observées la première fois par Graham. Voici les variations diurnes que l'on observa à Paris dans les jours qui ne sont pas marqués par quelques perturbations. Pendant la nuit, l'aiguille est à peu près stationnaire ; au lever du soleil elle se met en mouvement, et son pôle austral marche à l'ouest comme s'il fuyait l'influence de cet astre ; vers midi, ou plus généralement de midi à trois heures, il atteint son *maximum* de

Variations diurnes.

Variations diurnes à Paris.

déviation occidentale; ensuite, par un mouvement contraire, il revient à l'orient jusqu'à 9, 10 ou 11 heures du soir. Alors, soit que l'aiguille ait repris exactement sa position primitive, soit qu'elle s'en trouve seulement très rapprochée, elle s'arrête et reste immobile pendant toute la durée de la nuit, pour recommencer le lendemain une oscillation pareille.

Variations diurnes dans les régions du Nord.

Dans les régions du Nord les variations diurnes sont plus considérables et moins régulières; l'aiguille ne reste pas stationnaire; c'est vers le soir qu'elle atteint son maximum de déviation occidentale. Lorsqu'on s'approche de l'équateur magnétique, l'amplitude des variations diurnes va en décroissant, et à l'équateur magnétique elles sont sensiblement nulles. Au midi de l'équateur magnétique les variations diurnes se produisent dans un ordre inverse; l'extrémité nord de l'aiguille marche vers l'est aux mêmes heures où, dans l'hémisphère boréal, elle marche à l'ouest.

Variations diurnes à de grandes profondeurs.

Cassini a remarqué que dans les caves de l'Observatoire, à plus de 26 mètres sous terre et à l'abri de toute influence de la lumière et de la chaleur du jour, les variations diurnes étaient les mêmes qu'à la surface du sol.

Variations annuelles.

Des observations qui sont encore dues à Cassini, et qui remontent à l'année 1786, ont fait découvrir qu'à Paris l'extrémité nord de l'aiguille marchait chaque année vers l'est durant les trois mois qui séparent l'équinoxe du printemps du solstice d'été, et vers l'ouest pendant les neuf mois suivants. Gilpin a confirmé cette loi par des observations faites à Londres vers l'année 1800. En comparant ces observations et celles qui ont été recueillies depuis, M. Arago en a tiré les conclusions suivantes : quand la déclinaison est occidentale et augmente d'année en année, elle est soumise à une oscillation annuelle et marche vers l'est d'avril en juillet; l'amplitude de cette oscillation diminue à mesure que le mouvement séculaire se ralentit; elle disparaît quand la déclinaison atteint la limite de son mouvement occidental. Enfin, quand la déclinaison diminue séculairement, on observe de nouveau une oscillation annuelle, mais le mouvement vers l'est a lieu de septembre en décembre.

Perturbations.

La boussole de déclinaison peut être dérangée de sa position ou troublée dans ses variations diurnes par plusieurs

causes accidentelles. Ainsi, les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, peuvent avoir de l'influence sur l'aiguille aimantée. Quand la foudre tombe sur les corps aimantés ou dans leur voisinage, elle altère leur état magnétique, et même quelquefois renverse leurs pôles. On a vu des boussoles éprouver une déviation d'une demi-circonférence par l'effet de la foudre. Une des causes accidentelles qui a le plus d'influence sur la boussole, c'est l'apparition d'aurores boréales. Pendant toute la durée de ce météore, l'aiguille aimantée éprouve une déviation continuelle et une déviation souvent considérable. Ces effets se manifestent non seulement dans le lieu où l'aurore boréale est visible, mais encore à de grandes distances. Ainsi, par exemple, des aurores qui ne sont visibles qu'à Saint-Pétersbourg agissent à Paris sur l'aiguille aimantée; mais l'action est toujours d'autant plus grande que la boussole est plus rapprochée du lieu où le phénomène se produit. Cette remarquable coïncidence paraît jeter quelque jour sur la cause du magnétisme terrestre, et indique en même temps que l'aurore boréale est un phénomène électrique.

Aiguille astatique.

2019. On a quelquefois besoin d'expérimenter avec une aiguille de boussole sur laquelle le magnétisme terrestre n'exerce aucune action, et qui, pour cela, porte le nom d'aiguille astatique. Voici la description d'un appareil où cette condition est remplie. On dispose une boussole dont l'axe autour duquel oscille l'aiguille puisse être amené dans la direction de la résultante des forces magnétiques du globe; l'aiguille ne saurait être influencée en aucune manière par l'action de cette résultante. On dirige l'axe au moyen de deux mouvements rectangulaires, l'un avec une vis sans fin V et un rouet G dans lequel elle s'engrène; l'autre avec une vis V′ et un rouet G′ : un cercle cc' sert à marquer les positions de l'aiguille. On peut aussi se procurer un système astatique en plaçant aux deux extrémités d'une tige métallique deux aiguilles parfaitement semblables, également aimantées, dans une position parallèle, les pôles inverses en regard. Si toutes ces conditions étaient remplies, la terre ne saurait exercer aucune action sur cet appareil. Fig. 575.

§ III. *Inclinaison*.

Boussole d'inclinaison. 2020. La découverte de l'inclinaison date de 1576; elle est due à Robert Normann, de Londres, ingénieur en instruments de physique. Jusqu'à lui on avait supposé que l'aiguille devait être horizontale, et lorsqu'en Europe on remarquait l'abaissement de son pôle austral, on pensait que son centre de gravité était mal fixé; mais R. Normann mesura le contrepoids qu'il fallait ajouter, et fit ainsi une des plus importantes découvertes du magnétisme.

Fig. 576. La boussole d'inclinaison consiste en un plateau circulaire divisé A B, que l'on établit horizontalement au moyen des trois vis *a b c* et de deux niveaux à bulle d'air. Il supporte un cercle vertical fixé sur des montants C D, qui peuvent se mouvoir autour du centre du cercle horizontal. Les pièces horizontales E F portent à la hauteur du centre du cercle vertical une aiguille *x y* qui repose sur des petits supports en agate par un axe très délié passant par son centre de gravité. Lorsqu'on place le plan du cercle mobile de manière qu'il soit perpendiculaire au méridien magnétique, la force directrice de la terre rend l'aiguille verticale, parce que, dans cette position, les composantes horizontales de cette force sont détruites. Lorsqu'on fait tourner lentement le cercle vertical, l'aiguille s'incline de plus en plus, et atteint son maximum d'inclinaison quand le cercle est dans le méridien magnétique. Pour observer l'inclinaison, on commence par amener le cercle dans l'azimut où l'aiguille est verticale, et au moyen du cercle horizontal divisé on le place à 90 degrés de distance angulaire; il est alors dans le méridien magnétique, et on compte l'inclinaison sur le limbe.

2021. Dans l'exécution de cette opération il peut se présenter deux causes d'erreur : comme dans la boussole de déclinaison l'axe magnétique peut ne pas coïncider avec l'axe de la figure; on obvie à cette erreur par la méthode du retournement (2013).

La seconde cause d'erreur, dont l'influence est plus grande, c'est le défaut de coïncidence du centre de gravité avec l'axe de rotation. Pour reconnaître et corriger ce défaut s'il existe, on change les pôles de l'aiguille; la direction de l'aiguille

change de sens, et la demi-somme des inclinaisons observées sera l'inclinaison vraie. Comme pour les opérations avec les boussoles de déclinaison, il est nécessaire de faire quatre observations.

2022. L'inclinaison croît en général avec la latitude, et en sens contraire dans les deux hémisphères. Il existe, dans la zone torride, une suite de points où l'inclinaison est nulle. La ligne qui unit ces points est connue sous le nom d'*équateur magnétique*. Cette ligne, par ses sinuosités fort irrégulières, figure un grand cercle de la sphère. M. Biot, en discutant les observations de Cook et de W. Bayly, a déduit la forme de l'équateur magnétique et la position de ses *nœuds*, c'est-à-dire des points où il coupe l'équateur terrestre. M. Morlet, qui s'est aussi occupé de la détermination de l'équateur magnétique, en prenant en considération toutes les observations qui avaient été faites avant lui, détermine ainsi la forme de l'équateur magnétique et la position de ses nœuds. Il est en totalité au sud de l'équateur terrestre, entre l'Amérique et l'Afrique, et vient le couper par le 18e degré de longitude orientale. En partant de ce nœud et en se dirigeant vers la mer des Indes, la ligne sans inclinaison s'éloigne rapidement de l'équateur, et parvient dans la mer d'Arabie au maximum de ses excursions boréales, qui est de 12 degrés environ par 62 degrés de longitude orientale. De là jusqu'au second nœud, qui existe par 174 degrés de longitude au-delà de l'archipel des Carolines, la ligne sans déclinaison décrit plusieurs sinuosités, mais se maintient toujours dans l'hémisphère boréal. Entre ce second nœud et le premier, les sinuosités sont beaucoup plus prononcées, car on a reconnu un point de l'équateur magnétique commun avec l'équateur terrestre dans l'océan Pacifique, par 120 degrés de longitude occidentale; mais avant et après ce point la ligne sans inclinaison s'infléchit vers le sud d'une manière très sensible.

Inclinaison dans les différents points du globe. — Équateur magnétique.

2023. Les diverses observations d'inclinaison recueillies dans ces dernières années, durant les voyages de MM. Freycinet, Sabine et Duperrey, ne s'accordant pas avec la position de l'équateur magnétique déduite d'observations qui sont antérieures à 1780, M. Morlet en a tiré la conclusion que l'équateur magnétique se déplace avec le temps.

Déplacement de l'équateur magnétique.

M. Arago a en effet démontré que la différence des résultats obtenus aux deux époques peut très bien s'expliquer en admettant que l'équateur magnétique est doué d'un mouvement séculaire de l'est à l'ouest, et par conséquent dans le même sens que les lignes sans déclinaison. D'après cela, on trouve que les nœuds ont dû marcher, depuis 1780, de 10 degrés au moins dans ce sens.

M. Duperrey, en discutant les nombreuses observations d'inclinaison, pour les années 1823 et 1824, recueillies dans ses voyages, en les comparant aux autres observations exécutées à la même époque, a tracé la forme de l'équateur magnétique pour ce temps déterminé. Les nœuds sont au nombre de deux seulement et presque diamétralement opposés; celui de l'Afrique est maintenant dans l'océan Atlantique, à peu de distance des côtes du golfe de Guinée; le second nœud est dans le Grand Océan, toujours à l'ouest des Carolines et presque sous le méridien de Paris. Il existe entre la partie boréale et la partie australe de ce nouvel équateur magnétique une symétrie remarquable, et l'ensemble ne s'éloigne que par des sinuosités assez faibles d'un grand cercle de la sphère.

Équateur magnétique pour 1823 et 1824.

2024. D'après Hansteen, l'inclinaison est soumise comme la déclinaison à des variations diurnes et annuelles. Si les variations séculaires et périodiques, ainsi que les anomalies de l'inclinaison de l'aiguille aimantée, n'ont pas été étudiées par les observateurs autant que celles de la déclinaison, cela tient à ce qu'elles sont en général plus faibles et moins faciles à constater, mais leur existence n'en paraît pas moins démontrée.

Variations séculaire, périodiques et diurnes de l'inclinaison.

2025. Le tableau qui suit contient diverses observations d'inclinaison recueillies à Paris à différentes époques; celles qui précèdent 1798 peuvent être entachées d'erreurs, parce qu'alors on ne prenait pas, comme aujourd'hui, la moyenne de l'inclinaison.

Tableau de l'inclinaison pour Paris.

ANNÉES.	INCLINAISONS.	ANNÉES.	INCLINAISONS.
1671.	75°	1819.	68° 25′
1754.	72 15′	1820.	68 20
1776.	72 25	1821.	68 14
1780.	71 48	1822.	68 11
1791.	70 52	1823.	68 8
1798.	69 51	1825.	68 0
1806.	69 12	1826.	68 0
1810.	68 50	1829.	67 41
1814.	68 36	1831.	67 40
1816.	68 40	1835.	67 24
1818.	68 35		

§ IV. *Intensité du magnétisme terrestre.*

2026. Une des parties les plus intéressantes de la théorie du magnétisme terrestre, c'est la détermination de son intensité pour les différents points de la surface de la terre. Cette partie de la science a pris dans ces derniers temps un développement inattendu. Graham paraît, en 1772, s'être le premier occupé de cette grande question que Borda étudia ensuite dans toute sa généralité; mais ce sont les observations de M. Humboldt et sa puissante influence auprès des divers corps savants de l'Europe qui ont appelé sur ce sujet l'attention d'un grand nombre d'observateurs, et parmi eux, on doit surtout distinguer M. Gauss dont nous analyserons bientôt les remarquables travaux.

Méthode de Borda. Voici les principes sur lesquels repose la méthode de Borda suivie par M. de Humboldt. Une aiguille librement suspendue, lorsqu'on l'écarte un peu de sa position et qu'ensuite on l'abandonne à elle-même, fait de nombreuses oscillations si elle est régulièrement aimantée, et que l'axe de suspension passe par son centre de gravité; elle oscille par l'effort du couple magnétique de la terre, comme oscillait séparément chacune de ses moitiés, sollicitée par l'une des forces du couple. Ainsi, elle forme un véritable pendule composé, qui reste parfaitement identique quand la distribution du magnétisme reste exactement la même dans tous les points de substance; car si le fluide libre éprouvait quelque changement, soit dans sa quantité, soit dans son arran-

gement, la résultante aurait une autre intensité ou un autre point d'application, et la même aiguille formerait, en réalité, un pendule différent. Supposant donc que l'aiguille reste matériellement et magnétiquement la même, une différence dans la durée de ses oscillations ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité des forces qui la sollicitent, et, la pesanteur restant la même, elle ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité de la force magnétique. Nous allons maintenant indiquer le moyen suivi pour appliquer ces principes.

De la mesure de l'intensité du magnétisme terrestre.

Pour mesurer l'intensité du magnétisme terrestre, on se sert d'un petit barreau aimanté, suspendu à un fil sans torsion; on l'écarte du méridien magnétique par l'influence d'un morceau de fer qu'on rejette ensuite au loin. On compte les oscillations qu'il fait dans un temps donné, une minute, par exemple; le carré de ce nombre sert de mesure à l'intensité de la force directrice décomposée horizontalement. L'inclinaison étant connue, il est facile d'en conclure l'intensité de la force directrice totale. Les séries d'observations faites avec deux barreaux différents sont comparables quand le rapport des énergies magnétiques de ces barreaux est connu, ou celui des carrés des nombres d'oscillations qu'ils font dans le même lieu, à la même époque et durant des temps égaux. Les observations d'intensité obtenues avec un seul barreau ne sont comparables qu'autant qu'elles ont été effectuées à la même température. Quand cette condition n'est pas remplie, il est indispensable d'indiquer la température, et les résultats sont corrigés au moyen de tables dressées par M. Kupfer, qui s'est occupé du décroissement dans le magnétisme des aiguilles par suite de leur échauffement.

Lignes isodynamiques.

2027. Les observations d'intensités recueillies dans un grand nombre de lieux ont conduit M. de Humboldt à admettre que l'intensité magnétique du globe terrestre augmente en général avec la latitude, ou de l'équateur vers les pôles. Les points de la surface du globe où cette intensité est semblable forment des courbes appelées *isodynamiques*. M. de Humboldt a suivi une de ces courbes dans le nouveau continent. Elle coupe presque à angle droit l'équateur magnétique au Pérou, par 7 degrés de latitude australe et de 81 de longitude occidentale. L'intensité magnétique observée à

ce nœud péruvien étant prise pour unité, l'intensité magnétique à Naples sera représentée par 1,2745, à Milan par 1,3121, à Paris 1,3482. M. de Humboldt pensait que la courbe isodynamique du Pérou était celle du minimum d'intensité; mais les observations de M. Rossel, celles du capitaine Sabine, indiquent que l'intensité sur l'équateur magnétique est encore moindre dans l'Archipel des Grandes-Indes et sur les côtes occidentales de l'Afrique qu'au Pérou. M. de Humboldt regarde comme très probable que l'intensité magnétique varie sur la surface du globe entre des limites qui sont entre elles, comme l'unité à 2,6.

M. Duperrey a déduit d'observations nombreuses plusieurs lignes d'égale intensité; il est parvenu à construire neuf courbes isodynamiques, s'étendant sur les deux hémisphères. Ces courbes diffèrent complétement de celles d'égale inclinaison qu'elles coupent sous toutes les directions, souvent même à angle droit, comme au nœud péruvien de M. de Humboldt. M. Duperrey a fait la remarque importante que les courbes isodynamiques présentaient des formes analogues à celles des courbes isothermes déterminées par M. de Humboldt. Ce rapprochement semble indiquer que les différences d'intensité magnétiques dépendent des variations de la température.

2028. Les intensités de magnétisme terrestre observées par M. de Humboldt dans les Andes et les Cordilières, et par M. Kupfer dans le Caucase, démontrent le décroissement de l'intensité magnétique dans les lieux élevés. Si les observations recueillies par M. Biot et Gay-Lussac dans leur voyage aérostatique ne conduisent pas à ce résultat, cela dépend du changement que subit le magnétisme des aimants par suite des variations de température, et qui a pu compenser la diminution réelle de l'intensité du magnétisme terrestre. **Décroissement de l'intensité du magnétisme terrestre dans les lieux élevés.**

§ V. *Théories des phénomènes magnétiques terrestres. Appareils de M. Gauss.*

2029. Dans les premières théories du magnétisme terrestre, on regardait la terre comme un véritable aimant, agissant à distance; on pouvait supposer que les forces magnétiques étaient tellement distribuées dans toute la masse, que la ré- **Hypothèse d'un aimant central.**

sultante de toutes leurs actions pouvait être représentée par l'action d'un aimant central infiniment petit, de même que l'attraction exercée par un globe homogène est la même que si toute la masse était réunie à son centre. Suivant cette hypothèse, l'axe du petit aimant étant prolongé, coupe la surface de la terre en deux points qu'on nomme *pôles magnétiques*. A ces points, l'aiguille d'inclinaison est verticale et l'intensité magnétique est à son maximum. D'après cette même théorie, le grand cercle perpendiculaire à la ligne des pôles est l'*équateur magnétique*, courbe formée de tous les points où l'inclinaison est nulle, et où l'intensité magnétique est moitié de ce qu'elle est au pôle; entre l'équateur et le pôle, l'inclinaison et l'intensité magnétiques dépendent uniquement de la distance du point que l'on considère à l'équateur, ou de la latitude magnétique de ce point. Il résultait encore de la théorie dont nous parlons que l'aiguille horizontale, en un point quelconque, coïncidait toujours en direction avec l'arc de grand cercle mené de ce point au pôle magnétique situé vers le pôle nord ou le pôle sud, suivant que l'on se trouvait dans l'hémisphère septentrional ou l'hémisphère boréal. L'observation n'a pas sanctionné toutes ces déductions.

Hypothèse de deux aimants différents.

T. Mayer, il y a près de quatre-vints ans, soumit cette hypothèse au calcul; Hansteen substitua à l'action magnétique de la terre celle de deux aimants différant totalement d'intensité et de position, mais les observations ne s'accordèrent point avec cette hypothèse. M. Biot, partant de la même hypothèse que T. Mayer, parvint à découvrir une loi entre la latitude magnétique d'un point et l'inclinaison en ce point; loi qui sert aujourd'hui dans un grand nombre de circonstances et dont voici l'expression : « La tangente de l'inclinaison est double de la tangente de la latitude magnétique. »

2030. Si on considère les nombreuses irrégularités de toutes les courbes magnétiques que l'on a tracées à la surface du globe, on voit qu'il règne une grande obscurité sur la position et même sur le nombre des pôles magnétiques. Il existe cependant une dépendance nécessaire entre les éléments du magnétisme sur toute la surface de la terre.

Théorie de M. Gauss.

M. Gauss a trouvé, par l'analyse, l'expression mathématique de cette dépendance dans le cas où l'on suppose constant

l'état magnétique du globe. Cet illustre géomètre démontre que, quelle que soit la distribution des centres magnétiques dans l'intérieur de la terre, il existe certaines relations entre la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité du magnétisme pour différents lieux. Ces relations, exprimées par des séries convergentes, contiennent un assez grand nombre de constantes qui peuvent être déterminées à l'aide de huit observations complètes, faites en des lieux dont les coordonnées géographiques sont connues. Les constantes étant ainsi déterminées, on peut calculer, à l'aide des séries, les trois éléments du magnétisme terrestre pour tout nouveau point dont la position est donnée. Des tables construites par M. Gauss abrègent et facilitent les calculs numériques qui conduisent à ces valeurs.

La déclinaison, l'inclinaison et l'intensité magnétiques de différents points obtenus de cette manière, ont présenté un accord satisfaisant avec les résultats des observations directes. Les formules générales démontrent qu'il ne peut exister que deux points où la composante horizontale des forces magnétiques est nulle. Ces deux pôles magnétiques sont situés, d'après la théorie de M. Gauss, l'un par 73° 35′ de latitude boréale et 264° 21′ de longitude orientale, comptée à partir du méridien de Greenwich, l'autre par 72° 25′ de latitude australe et 152° 30′ de longitude orientale, rapportée à la même origine.

2031. Pour vérifier la théorie de M. Gauss, pour aborder par l'analyse l'état dynamique et pouvoir démêler les lois mathématiques qui régissent les variations régulières et irrégulières du magnétisme terrestre, les observations recueillies jusqu'à ce jour ne suffisent pas; il en faut obtenir de nouvelles faites simultanément en différents lieux, et dirigées principalement sur les variations de la déclinaison et de l'intensité horizontale. Il existe actuellement un grand nombre d'observatoires magnétiques répandus presque sur toute la surface du globe, où on se livre simultanément à cette étude importante. Cet élan a été communiqué surtout par M. Humboldt, M. Gauss, M. Arago, M. Kupfer et plusieurs membres de la Société royale de Londres. Comme on emploie dans tous ces nouveaux observatoires magnétiques des appareils beaucoup plus sensibles que ceux que

Nouvelles méthodes d'observation

nous avons décrits aux paragraphes précédents, il est important de les faire connaître au moins sommairement.

Magnétomètres.

2032. Ces appareils nouveaux ont été inventés par M. Gauss; il leur a donné le nom de magnétomètres, parce qu'ils peuvent servir à déterminer la grandeur absolue et les variations de l'intensité du magnétisme terrestre. Ils sont décrits et figurés avec beaucoup de soin dans le dernier volume de l'ouvrage de M. Becquerel.

Magnétomètre de déclinaison.

2033. La partie principale du magnétomètre employé pour mesurer les variations de la déclinaison consiste principalement en une longue aiguille prismatique d'acier fortement trempée aimantée par des procédés particuliers; elle a $0^m,608$ de longueur, $0^m,037$ de largeur, $0^m,01$ d'épaisseur, et pèse environ 1,800 grammes; ce barreau est suspendu à un fil de soie sans torsion de 3 à 4 mètres de longueur, attaché au plafond de l'observatoire magnétique.

Partie oscillante du magnétomètre.

Fig. 577.

A l'une des extrémités du barreau et perpendiculairement à son axe magnétique, est fixé un miroir plan ayant $0^m,05$ de hauteur sur $0^m,075$ de largeur. Voici la description de cette partie principale du magnétomètre. La figure représente la partie oscillante du magnétomètre, vue de l'ouest; elle est formée de deux crochets *a a*; on attache à l'une des deux goupilles qui prennent sous les deux crochets et par son extrémité inférieure le fil *g*.

b b, cercle de torsion sur lequel repose l'étrier *c c*.

d d, barreau aimanté.

e e, porte-miroir avec deux cadres *ff*, *h h*.

k k, deux sergents destinés à maintenir le miroir.

Toutes les parties de l'instrument sont exécutées en cuivre jaune très mince, afin de ne pas trop augmenter le moment d'inertie du magnétomètre. Le fil qui supporte l'étrier est fixé à une goupille qui passe sous les crochets *a a*. On peut ainsi enlever l'étrier sans détacher le fil.

b b, cercle de torsion muni d'un pivot vertical, dont l'extrémité supérieure porte les crochets *a a*. Ce pivot est entouré par l'étrier qui se meut autour de lui; par ce moyen l'étrier repose sur le cercle de torsion, mais il ne peut tourner en raison du frottement qu'il exerce sur le cercle.

e e, gaîne du porte-miroir, dans laquelle entre le bar-

reau aimanté sur lequel le porte-miroir est maintenu au moyen de vis.

ff, cadre tournant autour d'un axe vertical; ce cadre est fixé au moyen d'une vis de pression et d'une vis à demeure.

Au cadre *s* est uni un second cadre *ff* se mouvant autour d'un axe horizontal *h h*; à ce second cadre sont ajustés les trois sergents destinés à maintenir le miroir. Dans la figure on ne voit que deux sergents *k k'*, le troisième est couvert par le second sergent en *k'*.

La figure 578 représente l'appareil qui sert à suspendre au plafond le barreau aimanté, c'est-à-dire le porteur avec la vis et le fil vus du sud; sur le bord du liteau *c c* se trouve une échelle qui sert à marquer la position de la coulisse. **Porteur. Fig. 578.**

A 5 mètres du barreau et dans le méridien magnétique, on établit sur un support solide un théodolite dont la lunette est dirigé sur le miroir. Une règle horizontale divisée en millimètres est fixée sur le même support perpendiculairement au méridien magnétique, de telle manière que le zéro central des divisions se trouve sur l'axe vertical du théodolite. A une distance double de celle qui sépare la règle divisée du miroir, et de l'autre côté du barreau, et encore dans le méridien magnétique, se trouve une mire fixe. La lunette est toujours dirigée sur cette mire. Le grossissement doit être tel, qu'à une distance de 5 mètres du magnétomètre les objets soient agrandis au moins de 30 fois, afin de pouvoir apercevoir la division en millimètres et fractions de millimètres. Lorsque le miroir est perpendiculaire au plan passant par le fil de suspension du barreau et par l'axe du théodolite, le fil vertical de la lunette qui se projette sur la mire coupe l'image de la règle divisée en son zéro central; mais si la déclinaison varie, le miroir cesse d'être perpendiculaire au plan qui vient d'être défini, et le fil de la lunette coupe l'image de la règle sur une autre division plus ou moins écartée du zéro. Pour obtenir à tout instant la valeur absolue de la déclinaison, il suffit de mesurer, par des moyens astronomiques connus, cet angle que fait le plan qui passe par le faisceau de suspension et l'axe du théodolite avec le méridien magnétique.

2034. Le même instrument, au moyen de quelques modifications particulières, peut encore servir de magnéto- **Magnétomètre d'intensité,**

mètre d'intensité ; mais M. Gauss a encore imaginé un autre appareil, qu'il nomme *magnétomètre bifile*, pour servir à observer les variations de l'intensité horizontale ; c'est un barreau aimanté, suspendu horizontalement à deux fils parallèles entre eux, situés dans le méridien magnétique et dont la distance est réglée de telle sorte, que leur force directrice soit seulement un peu plus grande que celle du barreau sollicité par le couple terrestre. Après avoir observé la durée d'une petite oscillation du barreau, lorsque son pôle austral est dirigé vers le nord, on retourne ce barreau, en sorte que son pôle austral se dirige au contraire vers le sud pour observer la durée des nouvelles oscillations.

Magnétomètre bifile.

Les nombres étant ainsi obtenus, on tourne le système des fils de suspension jusqu'à ce que le pôle austral du barreau se dirige vers l'est ou vers l'ouest magnétique. Lorsque le barreau est dans cette position, les variations de sa direction, que l'on doit toujours observer à l'aide d'un miroir et d'un théodolite, dépendent uniquement des variations de l'intensité horizontale, si toutefois la force directrice reste constante.

2035. La puissante influence de MM. Humboldt et Gauss auprès des corps savants et des gouvernements de l'Europe est parvenue à faire établir dans presque toutes les positions du globe des stations magnétiques où l'on observe aux mêmes époques et avec les mêmes appareils. La Société royale de Londres, pour répondre à l'appel qui lui en a été fait, a rédigé les instructions les plus précises qui actuellement servent de base à toutes les recherches qu'on exécute.

Plan général d'observation.

Pour déterminer complétement les changements horaires et mensuels des éléments magnétiques, il faut un système persévérant et laborieux de recherches. Les changements irréguliers sont si fréquents et souvent si considérables, qu'ils cachent (en partie au moins) les changements réguliers, et les observations doivent être long-temps continuées aux mêmes heures avant de pouvoir assurer que quelques irrégularités n'affectent pas sensiblement les résultats moyens.

A chacun des observatoires il y a trois aides observateurs placés sous le commandement du directeur, et l'on doit prendre des observations de deux heures en deux heures pendant vingt-quatre heures. Pour que cette série d'obser-

vations, qui est spécialement destinée à la détermination des changements périodiques puisse en même temps jeter quelques lumières sur les mouvements irréguliers, elles doivent être simultanées dans tous les observatoires. Les heures qui ont été adoptées sont les heures paires (2, 4, 6, etc.), temps moyen de Gœttingue. Une observation sur douze doit être triple, la position des aimants étant notée cinq minutes avant et après l'heure principale. Le temps de cette triple observation sera à 2 heures après-midi (temps moyen de Gœttingue).

Pour éclaircir les lois des mouvements irréguliers, il est de la plus grande importance que les stations d'observation puissent être espacées autant que possible sur toute la surface de la terre, et que leurs positions soient choisies près des points *maxima* et *minima* des éléments magnétiques; c'est ce qui a été en général exécuté.

Dans ces observations, destinées à jeter du jour sur ces phénomènes, on consacre un jour dans chaque mois (le dernier samedi) à des observations simultanées, commençant la veille à 10 heures du soir (temps moyen de Gœttingue), et continuant pendant 24 heures toutes les 5 minutes.

Voilà le résumé du plan adopté et suivi dans les observatoirs magnétiques qui, grâce au concours actif des savants et des gouvernements d'Europe, ont été fondés sur les points les plus importants de toute la surface du globe.

LIVRE NEUVIÈME.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS GÉNÉRALES.

2036. Le premier phénomène électrique qui fut connu
Historique. est le suivant : quand on frotte avec une étoffe de laine ou de soie, un morceau d'ambre jaune ou succin, ce corps prend à l'instant une propriété très remarquable : il attire à lui tous les corps légers qu'on lui présente. On nomme *électricité*, du mot grec ἤλεκτρον qui veut dire ambre, la cause mystérieuse de ce phénomène qui fut observé par Thalès 600 ans avant l'ère chrétienne. Ce fait attira à plusieurs reprises l'attention des philosophes, mais il resta long-temps isolé; quelques autres phénomènes électriques furent notés par les historiens romains; mais ce ne fut que dans les temps modernes qu'on put démêler la liaison qui unissait ces faits. On trouve ce passage remarquable dans les Commentaires de César : « Vers ce temps-là parut dans l'armée de César un phénomène extraordinaire : au mois de février, vers la seconde veille de la nuit, il s'éleva subitement un nuage épais, suivi d'une pluie de pierres; les pointes des piques de la cinquième légion parurent s'enflammer. » (*De Bello africano, caput VI.*)

Un grand nombre de faits analogues que nous attribuons aujourd'hui aux phénomènes électriques furent observés par différents auteurs, mais on se borna long-temps à ces observations isolées; la science de l'électricité ne commença à poindre qu'au commencement du XVIIe siècle, époque à laquelle Gilbert, médecin anglais, observa de nouveaux phénomènes, rassembla quelques faits dont la réunion commença un corps de doctrine qu'on appela *électricité*. Depuis

ce temps, cette partie de la science reçut les plus remarquables perfectionnements; nous allons en exposer les phénomènes principaux et les théories qui s'y rattachent.

Des moyens employés pour développer de l'électricité dans les corps.

2037. Il existe un grand nombre de moyens de développer de l'électricité dans les corps; les plus importants sont : le frottement, la percussion, l'échauffement, le contact, les actions chimiques, etc. Nous examinerons plus tard en détail ces différentes questions; nous allons nous borner maintenant à examiner l'influence du frottement sur le développement de l'électricité.

Développement de l'électricité par le frottement.

2038. Lorsqu'on frotte avec une étoffe de laine ou de soie un morceau de succin ou un bâton de cire d'Espagne, ou un bâton de soufre, ces substances attirent à l'instant à elle tous les corps légers qu'on leur présente. Toutes les matières soumises au frottement ne jouissent pas de cette remarquable propriété; pour reconnaître celles qui en sont douées, on emploie des instruments connus sous le nom d'*électroscopes*.

Pendule électrique. Fig. 579.

Le plus simple de tous est le pendule électrique ; il se compose d'une petite boule de moelle de sureau suspendue à l'extrémité d'un fil de soie. Il faut pour la commodité de l'expérience attacher ce petit pendule à une tige solide recourbée portée sur un pied mobile, comme le montre la figure. En approchant la boule d'un corps électrisé elle est immédiatement attirée. Avec cet instrument si simple on peut distinguer facilement les corps qui deviennent électriques par le frottement de ceux qui ne le deviennent pas. Le succin, le verre, le soufre, la gomme laque, les résines, les alcalis végétaux, les diamants, les topazes et la plupart des pierres précieuses frottés avec une étoffe de laine attirent la boule de sureau du pendule électrique; le bois, le charbon, la terre, ne donnent ainsi que des signes très équivoques d'attraction. Les métaux et plusieurs de leurs combinaisons ne donnent aucun signe d'attraction. Le pendule électrique nous permet donc de séparer en deux grandes classes les corps de la nature : ceux qui prennent de l'électricité par le frottement, qu'on appelle *idio-électriques*, et ceux qui n'en donnent pas de signes, et qu'on nomme corps *anélectriques*. On pensait d'abord que cette dernière propriété était absolue, mais c'est une erreur. Tous les corps s'électrisent quand on les frotte; mais tous n'ont pas la faculté de retenir

l'électricité qu'on y développe, et pour qu'elle y reste, il faut qu'ils soient isolés comme nous le montrerons bientôt.

Corps conducteurs et corps non conducteurs. 2039. Si les métaux ne jouissent pas de la propriété de donner des signes d'électricité lorsqu'on les frotte en les tenant à la main, ils en possèdent une autre très remarquable, celle de transmettre instantanément l'électricité. On peut admettre d'après cela que l'électricité est un fluide particulier qui peut passer de la résine ou du verre frotté à un métal, et qui se répand instantanément sur toute la surface de ce corps. Tous les corps que nous avons appelés anélectriques transmettent l'électricité, et on désigne cette faculté en disant qu'ils sont de *bons conducteurs* de l'électricité; les corps idio-électriques sont appelés *non-conducteurs* ou mieux *mauvais conducteurs*. On appelle aussi ces derniers corps *isolants*, parce qu'on les emploie comme supports; ils servent à isoler les autres de toute communication avec les conducteurs qui pourraient leur enlever l'électricité. Cette faculté diverse des corps pour transmettre ou retenir l'électricité a été découverte par Grey. Il n'existe aucune relation constante entre l'état des corps et leur faculté conductrice. Pour les corps solides, les métaux, comme nous l'avons dit, transmettent parfaitement l'électricité; mais les résines, les alcalis végétaux secs ne la transmettent pas. La faculté d'isoler ou la non-conductibilité ne paraît appartenir à aucun corps d'une manière absolue; le spath d'Islande, la topaze blanche, occupent le premier rang sous ce rapport; viennent ensuite le quartz, le verre, les résines et presque tous les corps combustibles. Presque tous les liquides sont de bons conducteurs; cependant plusieurs huiles sont des conducteurs très imparfaits; elles diffèrent tellement entre elles sous ce point de vue, qu'on peut distinguer ainsi à l'aide d'un instrument particulier, dû à M. Rousseau, de l'huile d'olive qui a été falsifiée avec de l'huile d'œillette. La cire solide et le suif concret conduisent mal l'électricité; fondus, ils la conduisent bien. L'air atmosphérique est évidemment de la classe des corps non-conducteurs, car s'il livrait facilement passage à l'électricité, aucun corps qui y serait plongé ne pourrait produire des phénomènes électriques durables; or, on sait qu'un bâton de résine convenablement frotté conserve ses propriétés électriques pendant un temps consi-

dérable, quoiqu'il soit environné d'air. L'eau et sa vapeur conduisent, au contraire, très bien l'électricité. On sait que la vapeur aqueuse altère la propriété isolante de l'air, et c'est pour cela que les expériences électriques réussissent d'autant mieux que l'air est plus froid et plus sec.

2040. Si l'on met en contact avec un corps électrisé une sphère métallique, on remarque que cette sphère affaiblit d'autant les propriétés électriques du corps électrisé que son volume est plus considérable, en sorte que si elle avait une étendue incomparablement plus grande que le corps électrisé, elle rendrait insensible toute propriété électrique. La terre étant composée de substances qui conduisent l'électricité, si elle est en communication par suite de corps conducteurs avec un corps électrisé, c'est comme si l'on mettait ce dernier en contact avec un réservoir d'une capacité infinie, et toute propriété électrique apparente doit y disparaître; c'est d'après cela que l'on donne à la terre, dans la théorie physique de l'électricité, le nom de *réservoir commun*. Pour interrompre la communication d'un corps électrisé avec le réservoir commun, on le suspend et on le fait supporter par des corps mauvais conducteurs, comme le verre, la résine, le soufre, la soie, que par cette raison on nomme *isolateurs*. On conçoit maintenant pourquoi les métaux paraissent n'être pas électrisables par le frottement; c'est qu'en les tenant avec la main ils communiquent par le corps au réservoir commun, et que l'électricité s'y disperse à mesure qu'elle est développée. Mais en se servant d'un manche isolant de verre pour tenir un disque de métal lorsqu'on le frotte, il manifeste des signes d'électricité; tous les corps sont donc électrisables par le frottement.

Réservoir commun.

Corps isolants.

Isolateurs.

2041. Si nous examinons de plus près ce qui se passe lorsque l'on approche pour la première fois un bâton de résine frotté avec une étoffe de laine de la boule de sureau de notre pendule électrique; d'abord elle s'en approche, se porte sur lui et s'attache à sa surface; puis, après qu'elle l'a touché pendant un instant très court, qui suffit pour lui faire partager l'électricité du bâton de résine, elle est repoussée par lui et semble fuir tant qu'elle conserve ses propriétés électriques. La répulsion de la petite boule de sureau électrisée a lieu également, quelle que soit la nature de la

Des attractions et des répulsions électriques.—Expériences sur lesquelles est fondée l'hypothèse de deux fluides.

substance que l'on emploie pour lui communiquer de l'électricité, pourvu que ce soit toujours la même matière. Mais si, après lui avoir communiqué l'électricité d'un bâton de résine frotté avec de la laine, on en approche un tube de verre frotté de la même manière, bien loin de fuir ce nouveau tube, elle se portera vers lui avec beaucoup plus d'énergie que si elle n'avait pas été électrisée préalablement. La même chose a lieu si l'on commence par électriser la petite boule avec un tube de verre et qu'on en approche ensuite le bâton de résine; dans un cas comme dans l'autre il y a toujours attraction. Ainsi, lorsqu'un corps a été préalablement électrisé et isolé, comme notre petit pendule, les autres corps électrisés qui en approchent n'agissent pas tous sur lui de la même manière, puisque les uns le repoussent et les autres l'attirent.

Hypothèse de deux fluides électriques.

2042. De cette expérience fondamentale, qui est due à Dufay, on est naturellement conduit à distinguer deux sortes d'électricité, l'une analogue à celle que développe le verre frotté par une étoffe de laine : on la désigne sous le nom d'*électricité vitrée*; l'autre semblable à celle qu'exerce la résine pareillement frottée avec une étoffe de laine : on la nomme *électricité résineuse*.

On donne à l'électricité vitrée le nom d'*électricité positive*, et à l'électricité résineuse celui d'*électricité négative*. Nous emploierons quelquefois ces dernières dénominations, bien qu'elles aient été données dans la supposition que tous les phénomènes électriques pouvaient s'expliquer par une seule électricité qui serait tantôt en *excès* ou en *plus*, et tantôt en *défaut* ou en *moins*; parce que ces mots, *positif*, *négatif*, indiquent très bien deux propriétés contraires ; il y a en effet changement de signe dans les forces que manifestent les deux électricités, puisque l'une attire, l'autre repousse.

Fluide naturel.

On explique tous les phénomènes électriques en supposant qu'il existe dans tous les corps de la nature un fluide composé qu'on appelle *fluide naturel*, *fluide neutre*, et dont la présence ne s'annonce par aucun phénomène particulier, en admettant que ce fluide est composé de deux éléments qui se saturent réciproquement, mais qui prennent des caractères électriques très prononcés, aussitôt que l'un se trouve en excès par rapport à l'autre.

D'après cette hypothèse, le frottement de deux corps occasionne entre eux un partage inégal des deux fluides. On a vainement cherché jusqu'ici la cause qui déterminait ce partage; cependant on peut dire qu'il est dû à la différence de capacité et de conductibilité pour le calorique des deux corps frottés.

Tous les phénomènes d'attraction et de répulsion que nous avons observés pourront s'exprimer par cette loi très simple : *Les corps chargés d'électricité de même nature se repoussent; chargés d'électricité de nature différente, ils s'attirent.* Ces attractions et ces répulsions ne s'exercent pas seulement à travers l'air, elles se font sentir aussi à travers les autres corps non conducteurs, par exemple, à travers le verre et la résine. Si l'on suspend au centre d'un matras de verre un tube de cire d'Espagne frotté et électrisé, il attire les corps légers situés hors du matras, comme il faisait avant l'interposition des parois de verre.

Pour s'assurer si une substance donnée étant frottée d'une certaine manière acquiert l'électricité vitrée ou l'électricité résineuse, il faut essayer l'effet qu'elle produit sur le pendule électrique déjà chargé d'une électricité connue. Par exemple, on touche ce pendule avec un tube de verre frotté par une étoffe de laine : il prend l'électricité vitrée. On frotte de même la substance que l'on veut éprouver, et on l'approche ensuite du petit pendule : si elle le repousse, elle a l'électricité vitrée; si elle l'attire, elle possède l'électricité résineuse. On peut, si l'on veut, répéter l'épreuve inverse, en donnant d'abord au petit pendule l'électricité d'un tube de résine; alors les effets sont inverses aussi.

En soumettant à cette épreuve l'électricité développée par le frottement d'un grand nombre de substances, on voit que la nature de ces électricités n'a rien d'absolu, et qu'elle dépend de l'espèce du corps frottant tout autant que de celle du corps frotté. Par exemple, le verre poli frotté avec une étoffe de laine prend, comme nous l'avons dit, l'électricité vitrée; frotté avec une peau de chat, il acquiert l'électricité résineuse. La soie frottée avec la résine prend l'électricité résineuse; frottée avec le verre poli, elle prend l'électricité vitrée. Le même corps peut donner une électricité contraire lorsqu'on élève la température, ou simplement quand on

modifie l'état de ses surfaces. Lorsqu'on frotte l'un contre l'autre deux plateaux de verre, ils se chargent d'électricités opposées; celui dont la surface est la plus polie prend l'électricité positive. Deux parties, d'un même ruban de soie, frottées l'une en travers de l'autre, se chargent d'électricités contraires; le ruban frotté transversalement prend l'électricité négative. Si l'on fait glisser de la poudre métallique sur une plaque du même métal, la poudre s'électrise négativement et la plaque positivement. Quand on frotte l'un contre l'autre deux fragments de la même substance, une différeuce de température suffit pour qu'ils se chargent d'électricité opposée; le plus échauffé s'électrise négativement. La seule proposition générale qu'on puisse établir en comparant ces phénomènes, c'est que : *le corps frottant et le corps frotté acquièrent toujours des électricités diverses, l'une positive et l'autre négative.* Ce résultat se démontre facilement par l'expérience suivante. On isole les deux corps que l'on veut frotter l'un contre l'autre; on leur adapte des manches de verre ou de résine par lesquels on les tient. Lorsqu'on a opéré le frottement pendant quelques instants, on sépare les deux corps; et les tenant toujours par le manche isolant, on les présente tour à tour à un pendule électrique bien sensible, chargé d'une espèce d'électricité connue; alors on trouve constamment que l'un d'eux l'attire, et que l'autre le repousse; leurs électricités sont donc diverses.

Hypothèse d'un seul fluide.

2043. Quelques physiciens partagent encore les idées de Franklin, et n'admettent qu'un seul fluide électrique agissant par répulsion sur lui-même et par attraction sur la matière pondérable. Dans cette hypothèse, chaque corps doit contenir une certaine quantité de fluide, dépendant de sa masse et de sa nature, afin qu'il y ait équilibre électrique entre ce corps et tous ceux qui l'entourent. Plusieurs causes accidentelles, et entre autres le frottement, peuvent augmenter ou diminuer cette quantité nécessaire pour l'équilibre, et le corps est alors électrisé positivement ou négativement. Mais l'attraction ou la répulsion que l'on observe entre deux corps électrisés, différemment ou de la même manière, est un phénomène plus composé, et dont l'explication est moins simple dans l'hypothèse d'un seul fluide que dans la théorie des deux électricités.

Comme en définitive toute théorie se borne à coordonner les faits connus; comme l'hypothèse de deux fluides rend cette coordination plus facile, c'est elle que nous adopterons.

3044. L'électricité peut se communiquer au contact et à distance; son mode de communication dépend de la conductibilité des corps et de l'étendue de leur surface. Les mauvais conducteurs ne perdent au contact de l'électricité que dans l'étendue des surfaces touchées, mais les bons conducteurs la prennent ou la perdent dans toute l'étendue de leur surface. L'électricité qui se communique à distance se répand sur les corps à raison de leur conductibilité à son passage; elle présente le phénomène remarquable de l'étincelle électrique qui fut remarqué pour la première fois par Otto de Guericke, l'inventeur de la machine pneumatique. *De la communication de l'électricité.* *Étincelle électrique.*

CHAPITRE II.

ÉLECTRICITÉ PAR INFLUENCE.

§ I. *Considérations générales.*

2045. Un corps électrisé exerce des influences considérables à assez grande distance; il décompose ainsi les électricités naturelles de tous les corps conducteurs. Nous allons exposer les expériences fondamentales sur lesquelles repose la théorie de ces influences. Soit un conducteur A, que nous supposerons être un cylindre de cuivre terminé par des boules et porté sur un isolateur; admettons qu'il soit chargé d'électricité vitrée. Si dans son voisinage on place un autre corps conducteur semblablement disposé, mais dans un état naturel, au moment du rapprochement, le conducteur B donnera immédiatement des signes d'électricité; son extrémité C montrera de l'électricité résineuse, et son extrémité D de l'électricité vitrée. Il est facile de s'assurer qu'il en est ainsi: si l'on suspend à son extrémité deux boules de moelle de sureau, celle de l'extrémité C sera repoussée par un bâton de résine électrisé par le frottement, ce qui indique le *Fig. 580.*

même genre d'électricité, tandis que la boule de l'extrémite D sera attirée par le même bâton de résine, ce qui est l'indice certain d'une électricité contraire.

Si, sans avoir touché le conducteur B, on le transporte hors de la sphère d'influence du conducteur A, il reprendra son état naturel et ne présentera plus aucun caractère électrique. Si, au contraire, pendant que le conducteur B est encore sous l'influence du conducteur A, on le touche avec le doigt par son extrémité D, il perd aussitôt tout caractère électrique vers cette extrémité, et en contracte une beaucoup plus prononcée vers l'extrémité C; en l'éloignant de nouveau, il présentera dans toute son étendue le caractère de l'électricité résineuse. Voici comme on peut expliquer ces phénomènes : le conducteur A est chargé d'électricité vitrée qui agit, même à d'assez grandes distances, sur d'autres fluides électriques; le conducteur B, amené dans son voisinage, contient du fluide neutre qui est décomposé; le fluide résineux est attiré vers l'extrémité C du conducteur B par le fluide vitré du conducteur A, pendant que le fluide vitré est repoussé vers l'extrémité D. C'est dans cet état que les deux bouts du conducteur B annoncent des électricités opposées. Lorsqu'on éloigne le conducteur B sans l'avoir touché, les deux électricités, qui n'étaient séparées que par les influences du conducteur A, se recombinent et présentent de nouveau l'état naturel. Lorsque le conducteur B est touché au point D, pendant l'influence du conducteur A, il fournit une étincelle qui se compose de l'électricité vitrée qui était refoulée vers cette extrémité, et qui s'unit à l'électricité résineuse du doigt. Cette soustraction rend plus facile encore l'action décomposante du conducteur A, et l'électricité augmente en C. Enfin, lorsqu'après ce contact on éloigne le conducteur B du conducteur A, le fluide résineux se répand uniformément dans toute sa surface, mais n'y rencontre plus la quantité de fluide vitré nécessaire pour le saturer; c'est pourquoi le conducteur B conservera des caractères électriques résineux.

Une nouvelle preuve de la réalité de la séparation des fluides, c'est que, pendant l'influence du conducteur A, il y a, au milieu du conducteur B, un point qui ne présente aucun caractère électrique, et qui varie suivant la distance

à laquelle se trouve le conducteur A. On conçoit, du reste, que tous ces phénomènes sont proportionnels à la tension de l'électricité dans le conducteur A primitivement chargé, et au degré de rapprochement des deux conducteurs.

2046. Un corps électrisé par influence agit à son tour pour électriser les corps qui sont dans son voisinage et qui se trouvent dans sa sphère d'activité. Ces actions successives peuvent se propager à d'assez grandes distances.

Lorsqu'un corps conducteur est déjà électrisé, il n'en éprouve pas moins l'influence d'un autre conducteur également chargé d'électricité. Il peut arriver que les deux conducteurs A et B, précédemment cités, soient chargés chacun d'électricité semblable ou différente. Dans ce cas, les actions à distances s'exerceront d'abord sur les fluides libres; par exemple, si le conducteur A est chargé d'électricité vitrée et le conducteur B d'électricité résineuse, ces deux fluides s'attireront, et le maximum de leur tension, dans les deux conducteurs, se trouvera aux extrémités rapprochées. Cette action pourra même devenir telle, que les extrémités opposées ne donnent plus aucun caractère électrique; en sorte que l'on ne pourrait pas enlever au conducteur B son électricité en le touchant à son extrémité D. D'où l'on voit que, par suite de cette attraction réciproque, les deux électricités se trouvant en quelque sorte fixées, ne présentent plus leurs caractères ordinaires, et c'est ce que l'on désigne par les expressions d'électricités dissimulées.

Par une autre disposition, les deux conducteurs A et B peuvent se trouver chargés d'une électricité semblable; il arrivera alors que ces électricités se repousseront, que les extrémités opposées des conducteurs présenteront le maximum de tension, tandis que les extrémités rapprochées ne présenteront aucun caractère électrique.

2047. Les phénomènes d'influence à distance sont assez bornés lorsqu'on rapproche les corps sans autre intermède que l'air; car il arrive, à un certain degré de rapprochement, que les fluides qui s'attirent parviennent à vaincre la résistance de l'air pour se réunir entre les deux conducteurs, en produisant le phénomène de l'étincelle électrique et de l'explosion, sur lequel nous reviendrons plus tard. On peut rendre les phénomènes d'influence électrique plus prononcés

par des moyens qui permettent de rapprocher considérablement les conducteurs les uns des autres, en les séparant par une lame mince d'un corps non-conducteur, tel que le verre, la résine, etc.

Les actions par influence qui sont produites par un corps électrisé placé à peu de distance d'un corps isolé, paraissent avoir été observées, pour la première fois, par les missionnaires de Pékin, qui les firent connaître en Europe vers 1755.

§ II. *Électroscopes et électromètres.*

2048. On désigne sous les noms d'électroscopes et d'électromètres, des instruments destinés à reconnaître la présence de l'électricité, à distinguer sa nature et à mesurer son intensité. Quand ils sont seulement employés à découvrir l'électricité ou à en reconnaître la nature, on leur donne le nom d'électroscopes; quand ils sont destinés à en mesurer l'intensité, on les nomme *électromètres*. Ces instruments reposent sur les propriétés qu'ont les corps électrisés, ou d'attirer les corps légers, ou, lorsqu'ils sont électrisés de la même manière, de se repousser mutuellement. Le plus simple des électroscopes est le pendule électrique (2038).

Aiguille électrique. Fig. 581. L'aiguille électrique est encore un électroscope très simple, un peu plus sensible que le pendule; elle se compose d'un fil de cuivre terminé par deux boules métalliques creuses; au milieu de la longueur du fil est une chappe en agathe que l'on pose sur un pivot. Une faible action électrique suffit pour mettre l'aiguille en mouvement.

Électroscope à pailles. Fig. 582. 2049. L'électroscope dont on fait le plus souvent usage est ainsi disposé : il consiste en un flacon par le goulot duquel pénètre une petite tige métallique terminée à l'extérieur par un bouton, et portant à son extrémité inférieure deux pailles librement suspendues, parallèles et en contact. La partie supérieure de l'instrument est vernie à la gomme laque pour isoler complétement le petit conducteur, et sur l'une des faces du flacon se trouvent marqués des degrés qui mesurent l'écartement des deux pailles. Dans cet état, si l'on touche la boule extérieure avec un corps électrisé d'une manière quelconque, les deux pailles s'écartent; ce qui indique la présence de l'électricité dans ce corps, et jusqu'à un cer-

tain point sa quantité par le plus ou le moins d'écartement. Mais comme l'influence du poids des pailles s'accroît considérablement à mesure qu'elles s'approchent de l'horizontalité, cette dernière indication est fort inexacte. Ce même instrument peut servir à reconnaître la nature de l'électricité ; car, si après avoir produit l'écartement par une électricité connue, vitrée par exemple, on en approche un autre corps chargé d'une électricité inconnue, l'écartement persistera ou augmentera si l'électricité est vitrée, il diminuera ou cessera si l'électricité est résineuse. Il faudra seulement agir avec précaution, car les pailles, après avoir perdu leur électricité vitrée, pourront tout-à-coup s'écarter encore par le nouveau fluide, et le mouvement peut être si prompt qu'on n'ait pas le temps de l'apprécier.

2050. Si dans cet instrument on remplace les pailles par deux lames d'or battu très minces suspendues parallèlement l'une à l'autre, coïncidant dans toutes leurs parties, on a l'électroscope à feuilles d'or, qui est encore plus sensible. Électroscope à feuilles d'or.

2051. Coulomb a imaginé un électroscope aussi simple que sensible : il se compose d'un fil de cocon qui supporte une aiguille horizontale de gomme laque, à l'une des extrémités de laquelle est attaché un disque de clinquant. Pour maintenir l'horizontalité on établit à l'autre extrémité un contre-poids. Le fil de cocon est suspendu par une pince qui est fixée dans une pièce mobile *a a*, que l'on tourne quand on veut placer l'aiguille de gomme de laque dans une position déterminée. La pièce mobile est fixée au centre d'un couvercle de verre, qui recouvre une cloche également de verre, dans lequel on a ménagé une échancrure pour introduire les corps soumis à l'expérience, qui doivent attirer l'extrémité de l'aiguille pour la faire tourner. Si l'on veut comparer ensemble les quantités d'électricité, on ajoute à cet appareil plusieurs accessoires ; on remplace le fil de soie par un long fil d'argent d'un très petit diamètre et non recuit, et on a la *balance électrique* ou de torsion, dite de Coulomb (2061), dont nous parlerons bientôt. Électroscope de Coulomb. Fig. 583.

§ III. *De l'électrophore.*

2052. L'électrophore ou porteur d'électricité est un des

instruments les plus simples et les plus ingénieux ; il repose encore sur les principes de l'électricité par influence ; il a été inventé par Volta. Il se compose d'un gâteau de résine *g*, d'un plateau *p*, auquel est adapté un manche isolant *m*. La résine est coulée dans un moule de bois ou de métal ; sa surface supérieure doit être bien unie et bien plane. Le plateau est de cuivre avec un rebord arrondi, ou plus simplement de bois revêtu d'une feuille métallique. Son diamètre est plus petit que celui du gâteau de résine. Lorsque le plateau de résine a été frappé à plusieurs reprises avec une peau de chat (1), il se trouve chargé d'une grande quantité d'électricité résineuse. Si l'on prend alors le disque métallique par le manche isolant, et qu'on le pose sur le plateau de résine, son fluide naturel sera décomposé en grande quantité ; l'électricité vitrée sera attirée vers le plateau de résine, et le fluide résineux sera repoussé vers la face supérieure du disque. Si l'on retire alors le disque sans l'avoir touché, les deux fluides se recombineront et il reprendra son état naturel ; mais si, pendant que le disque est posé sur le plateau de résine, on met sa face supérieure en communication avec le sol en la touchant avec la main, elle fournira une étincelle et laissera échapper le fluide résineux. Si l'on écarte alors le disque métallique du plateau de résine, il deviendra immédiatement fortement électrisé de fluide, vitré et fournira une étincelle. Le gâteau de résine n'éprouve aucune perte d'électricité, celle qu'il possède n'agit que par influence sur le fluide naturel du disque métallique. Il en résulte qu'un semblable instrument ayant été bien électrisé, peut conserver pendant très long-temps la faculté de donner des étincelles, pourvu qu'il soit conservé dans un air très sec.

Figures de Lichtemberg. 2053. Lichtemberg, physicien allemand, a fait avec l'électrophore une expérience curieuse. Il traça des figures sur

(1) La peau de chat est très commode pour cette expérience et pour plusieurs autres analogues, parce qu'elle s'électrise très facilement ; c'est pour cela qu'en passant la main, dans un temps froid et sec, sur le dos d'un chat vivant, on voit les poils se hérisser et être attirés par la main, quelquefois même on les entend pétiller et l'on voit des étincelles. Les cheveux, lorsqu'ils ne sont pas graissés et qu'ils sont très fins, s'électrisent aussi avec facilité pendant les grands froids.

la surface du gâteau de résine avec une tige métallique possédant tantôt une électricité, tantôt l'autre; il projeta dessus, au moyen d'une espèce de soufflet, un mélange de soufre et de minium triturés ensemble: les parcelles de soufre se rendirent sur les figures négatives, et le minium sur les figures positives. L'explication de ce phénomène est facile: pendant leur projection les poussières s'électrisèrent par leur frottement mutuel; le soufre prit l'électricité positive, et le minium l'électricité négative: ces deux corps durent donc se porter sur les figures possédant l'électricité contraire à la leur.

§ IV. *Des machines électriques.*

2054. On nomme machines électriques des appareils au moyen desquels on développe par le frottement, et on accumule, au moyen d'un conducteur, une grande quantité d'électricité. Ils se composent essentiellement de trois parties: d'un plateau en verre, de frottoirs qui servent à dégager l'électricité, et de conducteurs isolés qui la recueillent et la conservent. La forme et la disposition de ces parties varient à l'infini. Otto de Guerike, l'inventeur de la machine pneumatique, a eu le premier l'idée d'accumuler sur un corps, par frottement, une grande quantité d'électricité. Son appareil consistait en un globe de soufre monté sur un axe horizontal auquel il imprimait un mouvement de rotation, tandis que l'autre était appliqué sur la surface du globe. Le frottement qui en résultait produisait un dégagement d'électricité assez considérable pour qu'il fût accompagné d'une traînée lumineuse. Au globe de soufre d'Otto on a substitué un manchon de verre, et à ce dernier un plateau en verre circulaire que l'on fait tourner au moyen d'une manivelle. La main a été remplacée par deux coussins de peau enduits d'un composé métallique entre lesquels tourne le plateau, et l'électricité dégagée sur le verre a été recueillie par des conducteurs métalliques convenablement isolés.

Voici la description de la machine électrique plus généralement employée. Le plateau de verre, dont le diamètre varie depuis 30 centimètres jusqu'à 2 mètres, tourne entre quatre coussins fixés entre quatre montants verticaux. On applique sur la surface postérieure de ces coussins des pla-

Description de la machine électrique. Fig. 584.

ques métalliques destinées à recueillir l'électricité négative, et à la transmettre au sol par l'intermédiaire d'une chaîne métallique; ils sont enduits à leur face intérieure avec du sulfure d'étain, or mussif, ou avec un amalgame de zinc. Les coussins doivent s'appliquer exactement sur le plateau et le presser légèrement; on remplit ces conditions en les rembourrant avec du crin et les appliquant sur des ressorts qui font effort pour les maintenir avec pression sur la glace. On attache aux coussins des morceaux de taffetas gommé qui, enveloppant une partie du plateau, empêchent qu'il ne perde une partie de son électricité.

Les conducteurs cylindriques en laiton sont parfaitement isolés au moyen de supports consistant en tubes pleins, en verre, dont la surface est recouverte de plusieurs couches de vernis à la gomme laque appliquées à chaud; ils sont armés à leurs extrémités de *mâchoires* destinées à soutirer l'électricité. Quand on veut produire de fortes charges avec de faibles tensions, ces conducteurs ne suffisent pas; il faut les mettre en communication avec un système de conducteurs longs et cylindriques, suspendus au plafond avec des cordons de soie parallèlement les uns aux autres.

Pour mettre la machine en activité, on sèche les supports et le plateau avec des réchauds; on sèche les coussins, on les frotte l'un contre l'autre après les avoir enduits d'or mussif; on les remet en place, on y adapte les morceaux de taffetas, on place la chaîne, on tourne la manivelle, et on entend un pétillement qui indique que les conducteurs se chargent d'électricité. Voici la théorie de cette action. L'électricité vitrée que le frottement développe sur le plateau agit pour décomposer par influence les électricités naturelles des conducteurs; elle repousse la vitrée qui se répand sur toute la surface des conducteurs, et attire la résineuse qui passe du conducteur au plateau pour le remettre à l'état naturel, ou du moins pour neutraliser d'une manière plus ou moins complète l'électricité vitrée dont il est chargé. L'électricité résineuse du coussin s'écoule continuellement dans le sol au moyen de la chaîne.

Machine destinée à donner alternativement

2055. Van Marum a imaginé une disposition de machine destinée à donner alternativement les deux électricités; elle diffère de la précédente en ce que les deux paires de coussins

élastiques rembourrés en crin sont placées aux extrémités d'un diamètre horizontal, et que les deux conducteurs mobiles AA′ et BB′ sont disposés de manière à recevoir l'électricité que l'on veut obtenir. Si l'on désire recueillir l'électricité positive, on tourne le conducteur A A′ de manière que les cylindres qui le terminent viennent se placer près de l'extrémité des garnitures en taffetas, tandis que l'autre conducteur mobile est dans une position horizontale et touche par ses extrémités aux coussins. Dès l'instant que la machine est mise en mouvement, le plateau porte son électricité positive au conducteur vertical; l'électricité négative est transmise au conducteur horizontal, d'où elle s'échappe dans le globe au moyen d'une petite chaîne C C′. Veut-on de l'électricité négative, on renverse les conducteurs, c'est-à-dire que celui qui était horizontal devient vertical, et réciproquement. Il résulte de cet arrangement, que le conducteur B B′ se décharge continuellement par l'intermédiaire de la chaîne de l'électricité positive que lui communique le plateau, tandis que l'autre conducteur prend aux coussins l'électricité négative qui leur est propre, et la transmet au conducteur M.

les deux électricités.
Fig. 585.

2056. On emploie en Angleterre une machine, celle de *Nairne*, qui donne à la fois les deux espèces d'électricités. Au lieu de plateau on se sert d'un cylindre creux de verre que l'on fait tourner sur son axe horizontal : l'électricité positive développée sur le verre passe sur le conducteur placé d'un côté; le fluide négatif se répand sur un conducteur opposé qui communique avec les coussins; mais il est préférable de ne chercher à obtenir qu'une seule espèce d'électricité à la fois, afin d'en accumuler davantage; il suffit pour cela de mettre l'un des conducteurs en communication avec le réservoir commun, au moyen d'une chaîne ou d'une tige métallique reposant sur le sol.

Machine de Nairne.
Fig. 586.

2057. Lorsqu'on veut établir une communication immédiate entre deux conducteurs, on emploie des excitateurs qui sont des tiges métalliques avec des manches isolants tournant à charnière autour d'un centre commun. Pour en faire usage on prend un de ces manches dans chaque main, et l'on ouvre plus ou moins les branches suivant la distance des deux conducteurs que l'on veut mettre en communication avec les deux extrémités. On a donné à cet appareil le

Excitateur.
Fig. 587.



nom d'excitateur, parce qu'il sert à tirer des étincelles, à les exciter d'un conducteur sur un autre. On peut varier la forme des excitateurs, mais le principe reste le même.

Limite de l'intensité des électricités dans les machines électriques.

2058. L'intensité des électricités dégagées dans une machine quelconque a toujours une limite qui ne saurait être dépassée; supposons que le plateau, après avoir été frotté entre les coussins, ait communiqué au conducteur l'électricité qu'il a acquise; le plateau ira se charger de nouveau et continuera à transmettre aux conducteurs de l'électricité positive, jusqu'à ce que la tension de celle-ci soit la même et sur le verre et sur les conducteurs; quand ce terme sera atteint, il sera impossible de communiquer plus d'électricité aux conducteurs; ils reprendront seulement au plateau la quantité qu'ils auront perdue à chaque instant dans l'air.

Théorie des machines électriques.

2059. Le frottement du plateau de verre entre les coussins ne suffit pas pour développer l'électricité, il faut les enduire préalablement d'une composition métallique, tantôt un amalgame composé de 6 p. de mercure, 2 p. de zinc et 1 p. d'étain, tantôt c'est de l'or mussif. Ces corps sont très altérables sous la double influence de l'air et du frottement. Si on applique sur les coussins un amalgame d'argent, de platine ou d'or, métaux qui ne s'oxident pas spontanément, il n'y a aucun signe d'électricité; tandis qu'en employant des amalgames de métaux oxidables, les effets sont très marqués quand on opère dans l'air; mais dans le vide ou dans le gaz acide carbonique sec, les effets sont à peine sensibles. Wollaston, physicien aussi exact qu'ingénieux, a conclu de ces faits que l'action chimique exerce une grande influence sur le dégagement de l'électricité dans les machines électriques, si toutefois elle n'est pas une des causes les plus déterminantes. Mais on doit admettre, d'un autre côté, que les phénomènes de chaleur développés par le frottement de corps hétérogènes peuvent suffire, à la rigueur, pour expliquer le dégagement d'électricité; cependant les observations de Wollaston n'en sont pas moins dignes de la plus grande attention.

CHAPITRE III.

LOIS DE L'ÉLECTRICITÉ.

§ I. *Loi des attractions et des répulsions électriques.*

2060. C'est encore Coulomb, ce physicien ingénieux qui, au moyen d'appareils analogues à ceux qu'il avait déjà employés pour découvrir la loi des actions magnétiques, qui démontra la loi fondamentale des attractions et des répulsions électriques dont voici l'énoncé : *Les attractions et les répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluide, et en raison inverse du carré des distances.*

2061. La loi des répulsions électriques a été déterminée au moyen de la force de torsion dont la loi est connue. La balance de Coulomb, appliquée à l'électricité, diffère peu de la balance magnétique (2000). Nous avons vu que dans la construction de cette dernière, il fallait éviter soigneusement l'emploi du fer ou de l'acier; dans la construction de la première il faut éviter avec le même soin les corps conducteurs. La balance électrique se compose d'une grande cage de verre qui doit contenir de l'air le plus sec possible, afin que les signes d'électricité y soient plus permanents. Pour cela on fait séjourner dans son intérieur du chlorure de calcium fondu, plusieurs jours avant d'employer l'instrument. La partie supérieure de la cage est percée de deux ouvertures circulaires, l'une au centre sur laquelle s'élève un tube de verre de 15 pouces de hauteur et de 3 pouces de diamètre, et l'autre sur le côté par lequel on introduit les corps électrisés. Au-dessus du tube de verre est un micromètre semblable à celui de la balance magnétique. Le fil d'argent qui est fixé au treuil du micromètre porte à sa partie inférieure une légère aiguille en gomme laque, très bien équilibrée et terminée par un petit disque vertical de papier doré de 6 à 8 lignes de diamètre. Sur le contour de la cage, et vers le milieu de sa hauteur, est une bande de papier qui porte les

Loi des répulsions électriques. Balance électrique. Fig. 588.

degrés. On commence par disposer l'appareil de manière que, dans l'état de repos du fil ou par une force de torsion nulle, l'aiguille horizontale de gomme laque soit dirigée vers le zéro de l'échelle tracée sur la paroi de la cage; dans cette position de l'échelle, le disque doit se trouver près de la boule B, dont le centre est à la même distance. Si alors on enlève de la cage la boule B, si on lui donne une faible tension électrique et qu'on la remette en place, le disque de clinquant C, en touchant la boule B, partage son électricité avec elle et est repoussée, et l'aiguille reste en équilibre lorsque la distance est telle que la force répulsive fait équilibre à la force de torsion. Dans une série d'expériences, l'angle du levier avec sa première position mesurée sur la division de la cage était de 36° en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les boules. Coulomb reconnut que, pour diminuer de moitié leur distance, il fallait faire marcher l'aiguille de 126°; et pour que la distance des boules ne fût plus que le quart de ce qu'elle était d'abord, il fallait faire tourner la même aiguille de 567°. Il est évident que dans ces deux dernières positions d'équilibre, la torsion du fil était égale à l'écart des deux boules, plus à l'angle décrit en sens contraire par le micromètre. Ainsi, dans ces trois opérations, les torsions étaient 36°, 18 + 126 et 9 + 567, ou bien 36, 144 et 576; or, ces nombres sont entre eux comme 1, 4, 16; et comme les distances étaient 1, 1/2, 1/4, il en résulte évidemment que les répulsions électriques suivent la loi de la raison inverse du carré des distances.

Loi des attractions électriques.

2062. Les attractions électriques s'exercent en vertu de la même loi que les répulsions. On peut la vérifier au moyen du même appareil, mais ces expériences exigent quelques précautions qui en diminuent la sûreté. Coulomb a préféré une autre méthode pour arriver à ce but. Le fil métallique de la balance électrique est remplacé par un fil de soie tel qu'il sort du cocon pour éviter la force de torsion, et la boule est éloignée à une plus grande distance de l'axe de suspension. On électrise le cercle de clinquant et la boule en les touchant avec deux corps chargés d'électricités contraires; il y a alors attraction, et le pendule horizontal de gomme laque, terminé par le cercle de clinquant, oscille de part et

d'autre de la position d'équilibre, ou de moindre distance à la boule. Or, en tenant compte de la déperdition de l'électricité, on observe que le temps d'une oscillation augmente dans le même rapport que la distance du cercle à la boule. Ce résultat de l'expérience démontre que la loi des attractions électriques est encore celle du rapport inverse du carré des distances.

2063. On emploie encore la balance de torsion pour démontrer que les attractions et répulsions électriques sont proportionnelles aux produits des intensités ou des quantités d'électricité qui agissent l'une sur l'autre. Pour le démontrer, on s'appuie sur ce principe, que deux sphères conductrices et de même rayon qui sont mises en contact se partagent également les électricités qu'elles possèdent. Ainsi, après avoir observé la force de torsion qui fait équilibre à la force répulsive ou attractive de deux boules à une distance connue, si l'on vient à toucher l'une d'elles avec une troisième boule exactement semblable, l'on observe que pour la même distance la force de torsion se trouve réduite de moitié. En prenant de nouveau, par le même procédé, la moitié du fluide qui reste sur l'une ou l'autre des boules, on réduit la force à la moitié de sa valeur; et si l'on prenait simultanément la moitié du fluide qui se trouve sur chacune des boules, la force serait réduite au quart de ce qu'elle était primitivement. **Mesure des charges électriques.**

§ II. *Loi de la perte de l'électricité par l'air.*

2064. Les phénomènes que manifestent les corps électrisés diminuent avec le temps; l'électricité accumulée sur les corps s'échappe dans l'air ou s'écoule dans le sol dans un temps donné; il importe beaucoup pour la précision des expériences électriques de pouvoir déterminer et mesurer l'intensité de cette déperdition. La perte par l'air est en grande partie due à la vapeur d'eau, qui est toujours plus ou moins abondante dans l'atmosphère; on peut vérifier qu'elle augmente à mesure que l'hygromètre marche à l'humidité. Cette perte croît encore avec la charge du corps électrisé, avec l'agitation de l'air et sa température. Coulomb a trouvé, au moyen de nombreuses observations exécutées à

l'aide de sa balance électrique, que dans un air tranquille conservant la même température et dont l'état hygrométrique reste toujours le même, que la perte faite dans un temps très court était proportionnelle à la charge électrique ou toujours égale à la même fraction de cette charge. On peut, d'après cette loi, déterminer au commencement d'une série d'expériences faites dans les mêmes circonstances, la perte de l'électricité pendant un certain nombre de secondes, et corriger ainsi de cette perte toutes les observations faites à des intervalles de temps connus. Coulomb a trouvé que dans les jours secs cette perte n'est par minute que de 1/60e et même 1/70e, et dans les temps humides elle est quelquefois de 1/20e.

§ III. *Loi de la perte par les supports.*

2065. La perte par les supports isolants se fait en grande partie par la couche mince d'humidité dont ils sont souvent revêtus; elle peut se faire également s'ils ne sont pas des parfaits non-conducteurs à travers leur substance. La cause dépendant de l'humidité adhérente a une grande influence, c'est pourquoi il est nécessaire d'enduire la surface de ces corps d'une couche de gomme laque en les couvrant d'un vernis dont cette substance est la base. Coulomb a trouvé que la perte due aux supports peut être annulée; car, d'après ses expériences, un cylindre de gomme laque d'une longueur suffisante isole complétement un cops électrisé. On démontre ce fait en suspendant de petites boules à des tiges cylindriques en gomme laque de plus en plus longues; on trouve que, passé une certaine limite de longueur de la tige, une boule électrisée perd la même quantité d'électricité dans le même temps. Cette expérience démontre que la perte ne peut être attribuée qu'au seul contact de l'air. Coulomb a trouvé que cette limite de longueur variait comme le carré de la charge électrique à isoler.

§ IV. *Lois de la distribution de l'électricité.*

Détermination des rapport des ten- 2066. C'est Coulomb qui a encore déterminé avec le plus grand soin les tensions électriques dans les différents points

de la surface d'un corps conducteur électrisé. Nous avons vu précédemment (2041) que lorsqu'on touche une boule électrisée avec une autre boule semblable à l'état neutre, il y a partage d'électricité; le résultat en est le même en employant une boule d'un métal différent. Il y a encore partage égal quand l'une des boules est creuse et que l'autre est pleine, et cela quelque mince que soit l'épaisseur de l'enveloppe qui compose la première. Il découle naturellement de ces faits que l'électricité libre qui se répand sur un corps conducteur, dépend de son volume, non de sa nature, et qu'elle réside seulement à sa surface pour y former une couche très mince. Occupons-nous maintenant d'apprécier la distribution de l'électricité sur les corps conducteurs. Dans le cas d'une sphère isolée et électrisée, on ne peut supposer que l'épaisseur de la couche électrique varie autour d'elle, mais pour toute autre forme de corps on comprend que la quantité d'électricité doit différer d'un point à l'autre.

sions dans les différents points de la surface d'un corps conducteur électrisé.

Plan d'épreuve.

2067. Pour déterminer par l'expérience la loi de la distribution de l'électricité libre à la surface des corps d'une forme quelconque, Coulomb a employé un petit instrument, nommé *plan d'épreuve*, qui consiste en un petit disque de papier doré ou de clinquant fixé par de la gomme laque à l'extrémité d'un tube de verre. Si l'on met en contact le petit disque avec un point quelconque de la surface d'un corps électrisé, la tension qu'il acquerra par ce contact sera proportionnelle à celle du point du corps conducteur qu'il a touché. Le plan d'épreuve peut être réellement considéré comme un élément du corps que l'on détache, et les rapports des tensions électriques qu'il indiquera dans la balance, lorsqu'on l'aura successivement placé en différents points de la surface d'un corps conducteur électrisé, donneront les rapports des intensités électriques en ces mêmes points. La perte de l'électricité par l'air exigerait des corrections, mais on peut admettre que la perte dans un temps très court est proportionnelle à ce temps, ce qui revient à regarder la charge comme constante pendant toute sa durée, et l'erreur possible est d'autant moindre que le temps est plus court. Voici le mode général d'observation. On place successivement le plan d'épreuve sur divers points du corps exploré à des intervalles de temps très courts, mais

égaux entre eux. A chaque fois on dispose le plan dans la balance électrique pour évaluer au moyen de la torsion l'énergie de la force répulsive qui donne l'intensité de la couche électrique dans les différents points du conducteur électrisé. En opérant ainsi, Coulomb est arrivé aux résultats suivants : dans les corps sphériques la tension est la même dans tous les points, et ce sont les seuls pour lesquels l'uniformité de tension subsiste. La tension du fluide électrique à la surface d'un corps conducteur dépend de la quantité d'électricité et de l'étendue de la surface qu'elle occupe ; il en résulte évidemment qu'en cas de partage l'électricité diminue de tension à mesure qu'elle s'étend sur une plus grande surface.

Examinons maintenant la tension électrique dans les divers points de conducteurs d'une forme quelconque. Dans les lames prismatiques, ou les cylindres très allongés, la tension est sensiblement la même du milieu jusqu'à 27 millim. de distance des extrémités ; au-delà elle croît avec une grande rapidité. Dans les plaques circulaires, les variations de tension ne se manifestent qu'à 8 à 10 centim. du bord, et à partir de cette limite elle croît rapidement à mesure qu'on s'approche du bord, et les points également distants du centre ont la même tension. Dans un ellipsoïde, la tension aux extrémités du grand axe est plus grande que dans tous les autres points, et la différence de tension aux extrémités des axes augmente avec le rapport de leur longueur.

Distribution de l'électricité sur deux sphères conductrices et isolées.

2068. Coulomb a encore employé le plan d'épreuve pour étudier le mode de distribution de l'électricité libre sur deux sphères conductrices et isolées, rapprochées au contact. Voici les principaux résultats de ses observations. Près du point de contact, l'épaisseur de la couche électrique est nulle sur les deux sphères ; dans le cas de deux sphères égales, la couche électrique, surtout le grand cercle passant par le point de contact, n'acquiert une valeur sensible qu'à 20° de ce point, croît rapidement de 20° à 60°, plus lentement de 60° à 90°, et conserve sensiblement la même valeur de 90° à 180°. Dans le cas de deux sphères inégales, l'épaisseur de la couche électrique sur la petite sphère, à 180° du point de contact, est plus grande que celle au point correspondant et opposé de la grande sphère ; le rapport de ces épaisseurs augmente

avec celui des rayons des deux corps et s'approche indéfiniment, suivant Coulomb, du nombre 2, à mesure que le rayon de la petite sphère diminue. M. Poisson en abordant le même sujet au moyen de l'analyse mathématique, est arrivé aux résultats indiqués par les expériences de Coulomb; toutefois la théorie indique que le rapport des épaisseurs de la couche électrique aux extrémités opposées des diamètres des deux sphères menés par le point de contact a pour limite le nombre 1,55, quand l'un des rayons tend vers zéro, tandis que Coulomb avait assigné 2 pour la valeur de cette limite.

2069. Pour le corps de forme conique, le calcul nous montre que la tension électrique devient infinie vers le sommet. Une pointe très aiguë peut toujours être considérée comme étant le pôle d'un ellipsoïde de révolution extrêmement allongé; alors, on comprend que, quelque faible que soit la charge électrique d'un tel corps, le fluide qui s'accumule à son sommet aura toujours une tension infinie, et l'expérience nous montre que dans cet endroit l'électricité surmonte l'obstacle que l'air lui oppose et se perd. Cette propriété constitue le pouvoir des pointes qui avait été découvert par Franklin avant qu'il fût expliqué par la théorie. Dans les idées anciennes, on disait que les pointes avaient le pouvoir d'attirer l'électricité; c'est le contraire qui est vrai; elles ont la propriété de laisser écouler le fluide dont elles sont chargées. En vertu du pouvoir des pointes, on conçoit facilement que quand une pointe fait partie du système des conducteurs d'une machine électrique, la charge ne peut atteindre une intensité égale à celle qu'elle aurait si la pointe était enlevée. On le démontre facilement au moyen de l'appareil suivant. On place sur la machine un petit pendule formé d'une tige métallique à laquelle est suspendue par un fil conducteur une boule dont l'écartement peut faire juger de la charge; on observe alors qu'une même vitesse du plateau donne lieu à un écartement maximum du pendule très différent, suivant que le système des conducteurs est ou n'est pas muni d'une pointe; l'intensité de la charge qu'une machine électrique peut acquérir est encore diminuée, lorsqu'on met en présence des conducteurs une pointe communiquant avec le sol par une

Pouvoir des pointes.

Fig. 589

chaîne conductrice. Dans cette circonstance, l'électricité développée sur la machine, agissant à distance, repousse dans le sol le fluide de même nom, et attire vers la pointe le fluide contraire, qui acquiert une tension suffisante pour vaincre la résistance de l'air et venir neutraliser une partie de l'électricité influente. Si on place sous les conducteurs d'une machine un timbre à pointe de 30 centimètres à 1 mètre de distance, le bruit des petits pendules annonce l'écoulement de l'électricité. Cette expérience repose sur les mêmes principes que la précédente. En parlant de la lumière électrique et de l'électricité atmosphérique, nous reviendrons sur quelques propriétés remarquables des pointes.

Timbre à pointe. Fig. 590.

CHAPITRE IV.

ÉLECTRICITÉS DISSIMULÉES.

2070. Nous avons vu dans le chapitre précédent qu'un conducteur de petite dimension, comme le plan d'épreuve (2067), prenait à un très grand conducteur une quantité d'électricité produisant une tension égale dans l'un et dans l'autre; jusqu'ici nous avons admis que des tensions égales indiquaient des quantités d'électricité égale, cependant les choses ne se passent pas toujours ainsi; il y a des circonstances, qu'il nous reste à exposer, dans lesquelles une grande quantité d'électricité accumulée peut très bien ne produire qu'une faible tension : on lui donne alors le nom d'électricité dissimulée. Nous allons exposer la théorie de ces remarquables phénomènes, et nous verrons qu'il est un grand nombre de cas dans lesquels il est nécessaire de donner lieu à de semblables accumulations d'électricité pour rendre sensible la présence de quantité d'électricité dont la tension est très faible. Exposons d'abord les conditions dans lesquelles l'électricité peut être rendue latente. Si on prend deux disques conducteurs séparés par une lame non conduc-

trice de verre ou de résine ; quand un de ces disques reçoit de l'électricité vitrée par exemple, que l'autre disque reçoit de l'électricité résineuse, ces deux électricités s'attirent au travers de la lame non conductrice et pressent les faces opposées par lesquelles elles font effort pour se rejoindre ; on dit alors que ces *électricités sont dissimulées* ; en effet, quand ces disques sont ainsi chargés, on peut les toucher l'un ou l'autre sans que leur fluide s'écoule dans le réservoir commun ; mais seulement quand on les touche séparément et non pas simultanément ; le fluide de celui qui est touché n'obéit pas à la force répulsive qui lui est propre, parce qu'il est attiré et retenu par le fluide de l'autre. Dans ce qui précède, nous avons supposé que les disques recevaient de l'électricité, l'un d'une source résineuse, l'autre d'une source vitrée. Le plus souvent on n'électrise qu'un seul disque, l'autre est mis en communication avec le sol, alors celui-ci se charge par influence.

2071. Supposons que l'on mette en présence deux lames métalliques A et B isolées au moyen d'un tube de verre, munies sur leurs surfaces extérieures de deux pendules pourvus de tiges conductrices *a* et *b*. Si maintenant on vient à électriser la lame A positivement par exemple, on observe un effet très remarquable : non seulement le pendule *a* s'écarte de A, mais aussi le pendule *b* de B. Ce dernier écartement, déterminé par une électrisation par influence, est d'autant plus considérable que la distance des deux lames est moindre. Si par un moyen quelconque on éloigne B de A, cet écartement diminue, et B rentre dans l'état naturel. Il ressort de là que la quantité d'électricité négative attirée vers la surface antérieure de B est limitée par l'attraction que l'électricité positive repoussée sur la surface postérieure exerce sur elle, et qu'elle augmenterait si cette force était supprimée. On remplit facilement cette condition en mettant B lorsqu'il est sous l'influence de A en contact avec le réservoir commun ; le pendule *b* retombe alors sur la lame B, ce qui n'indique pas que cette lame a perdu toute son électricité, car elle contient toujours de l'électricité négative dont la présence se manifeste par l'écartement du pendule *b* aussitôt que l'influence de A est écartée. Lorsqu'on met ainsi B en communication avec le réservoir commun et que

Théorie de l'électricité dissimulée. Fig. 591.

le pendule b redescend, l'électricité de A semble se dissiper également, car on remarque que le pendule a se rapproche de la lame ; mais comme cette lame n'a pas été touchée, cette moindre tension de l'électricité sur la face de A est causée par une autre distribution de la même quantité d'électricité sur cette lame.

Accumulation de l'électricité dissimulée.

Il résulte de là que si l'on avait électrisé A en le mettant en contact avec une source constante d'électricité positive, la nouvelle distribution d'électricité qu'a déterminée la fuite de l'électricité positive de B dans le réservoir commun, permet au corps A de recevoir une seconde dose d'électricité quand on le met de nouveau en contact avec la source. Cette seconde dose décompose une nouvelle portion du fluide naturel de B, et le pendule b s'écarte. Si l'on fait communiquer une seconde fois B avec le sol, son pendule b retombe, et il s'accumule sur sa face extérieure une nouvelle quantité d'électricité négative, qui change encore la distribution de l'électricité sur A, en sorte que a se rapproche du plateau, et indique que la source peut encore donner une troisième dose d'électricité à A. On peut donc par une suite d'opérations semblables, c'est-à-dire en mettant successivement A et B en contact, le premier avec la source, le second avec le sol, accumuler sur a une quantité d'électricité positive beaucoup plus grande que celle qui lui serait communiquée par la source constante, si le corps B n'était pas en sa présence. Une autre conséquence à tirer dans cette série d'opérations de la chute des pendules, lorsqu'on met B en communication avec le sol, chute qui est complète pour b et partielle pour a, c'est que A contient plus d'électricité positive que B ne contient d'électricité négative, cette dernière étant totalement dissimulée ou latente.

Condensateurs.

2072. On donne le nom de condensateurs aux appareils dans lesquels on accumule de l'électricité dissimulée. Ces appareils se composent exactement comme ceux que nous venons de décrire, de deux lames conductrices, soit deux feuilles métalliques séparées par un corps non conducteur, soit une plaque de verre. Quand il s'agit de reconnaître des sources d'électricités très faibles, on préfère l'interposition d'une couche de vernis isolant d'une petite épaisseur.

La quantité d'électricité que peut accumuler un conden-

sateur est proportionnelle à la surface des plateaux, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante. Néanmoins, il y a des limites qu'on ne peut dépasser; en effet, si les surfaces ont trop d'étendue, la construction des disques devient très difficile, ainsi que leur manœuvre; si la lame isolante a trop peu d'épaisseur, elle n'offre plus assez d'obstacle à la recomposition des deux fluides, qui peuvent la presser avec tant de force qu'ils s'ouvrent un passage au travers de sa substance et la percent pour se rejoindre. Si cette lame est de résine ou de soufre, il se fait alors une multitude de petites fissures imperceptibles; mais si elle est de verre mince, les fluides ne font qu'un seul trou par lequel ils se précipitent avec éclat pour se recomposer.

2073. Le condensateur à taffetas gommé est formé de deux pièces, d'un plateau en bois recouvert de taffetas gommé, et d'un plateau métallique qui est muni d'un manche isolant. Le plateau métallique étant mis en communication avec une source électrique, soit directement, soit au moyen d'une tige à boule, le fluide électrique se répand sur toute sa surface, agit par influence au travers du taffetas sur les électricités naturelles du plateau de bois qui doit communiquer avec le réservoir commun. En enlevant le plateau métallique, on le trouve chargé d'une électricité assez intense et de même nature que celle de la source. Le taffetas gommé étant très mince, rend facile le jeu des électricités par influence. Cet appareil est convenable quand il s'agit de recueillir de l'électricité dont la tension n'est pas très énergique. **Condensateur à taffetas gommé. Fig. 592.**

2074. Volta, en partant du principe que l'effet d'un condensateur est d'autant plus marqué que le corps isolant intermédiaire est plus mince, construisit un condensateur propre à recueillir de très faibles quantité d'électricité. On nomme cet appareil condensateur à feuilles d'or. Entre les mains de Volta et celles de ses successeurs, il a servi à une foule de recherches des plus importantes sur l'électricité; c'est un véritable électroscope à lame d'or (fig. 593) sur lequel on adapte deux plateaux métalliques minces et bien dressés au tour, et recouverts sur leur surface de contact de plusieurs couches de vernis à la gomme laque. Le plateau inférieur est vissé sur l'électroscope, et le plateau supérieur est muni d'un manche isolant de verre. Les couches de **Condensateur à feuilles d'or. Fig. 593.**

vernis remplacent le plateau de verre et le taffetas gommé ; mais comme ces couches sont excessivement minces et que les plateaux métalliques joignent aussi bien que possible, il en résulte que leur force condensante est considérable. Le plateau inférieur est appelé *collecteur*, parce qu'il sert à rassembler l'électricité; il faut avoir l'attention d'enlever le plateau supérieur perpendiculairement et sans produire de frottement. Souvent aussi, une petite quantité d'électricité pénètre dans les couches de vernis et ne s'en dégage que difficilement; on place alors entre les deux disques une feuille très mince d'étain soit pour enlever, soit pour assurer par son intermédiaire la composition des deux électricités contraires, s'il s'en trouve sur les couches de vernis. Cet appareil ne doit être employé que pour recueillir de très faibles charges d'électricité ; car si elles sont trop fortes, elles percent la couche de vernis.

Carreau électrique.

2075. On donne le nom de carreau électrique à un appareil qui consiste en une lame de verre, sur les faces opposées de laquelle on a collé deux feuilles d'étain, de façon qu'elles s'arrêtent toutes les deux à 3 centimètres environ de la lame de verre. Cet appareil est un véritable condensateur. Si l'on fait communiquer la face supérieure avec les conducteurs de la machine électrique, et la face inférieure avec le réservoir commun, ces deux faces se chargeront d'électricités opposées qui pourront produire une forte étincelle au moment où on leur donnera le moyen de se réunir.

Bouteille de Leyde.

2076. Si l'on veut se procurer des décharges plus considérables que celles que l'on obtient avec le condensateur ordinaire, on a recours à des appareils dont la construction repose sur les mêmes principes. Le premier appareil de ce genre est la *bouteille de Leyde*, qui joue un si grand rôle dans l'histoire de l'électricité, dont le nom est tiré de celui de la ville où cet appareil a été imaginé. La construction de la bouteille de Leyde est très simple. On prend une bouteille de verre mince que l'on tapisse à son extérieur d'une feuille d'étain, jusqu'à une certaine distance du goulot; on vernit cet intervalle pour rendre l'isolement plus parfait; on place dans l'intérieur de la bouteille des feuilles légères d'or ou de cuivre battu ; on fixe dans le goulot une tige de cuivre terminée en dedans par une pointe, et en dehors par une petite

Fig. 594.

sphère, et on a un véritable condensateur, dont l'un des disques sera représenté par les feuilles légères qui peuvent s'appliquer contre la paroi interne de la bouteille et qui communiquent avec le bouton, tandis que l'autre le sera par l'*armature* extérieure de la bouteille.

Lorsque l'on suspend cette bouteille de Leyde au conducteur d'une machine électrique, sans toucher l'extérieur, elle ne se charge pas; mais lorsque l'on fait communiquer l'extérieur avec le réservoir commun, elle se charge comme le condensateur. Si la machine fournit de l'électricité vitrée, la bouteille contient cette nature d'électricité en dedans, et de l'électricité résineuse en dehors. Lorsque l'on pose la bouteille sur un plateau isolant, on pourra tirer alternativement un grand nombre d'étincelles du dedans et du dehors, et décharger peu à peu la bouteille. Enfin, en faisant communiquer l'intérieur avec l'extérieur, la bouteille se déchargera en produisant une forte commotion. Il est facile de charger la bouteille dans le sens contraire, en tenant à la main la boule qui communique dans l'intérieur et touchant le conducteur électrisé avec l'extérieur de la bouteille. Dans ce cas, cet extérieur sera électrisé vitreusement et l'intérieur résineusement.

2077. On donne le nom de batteries électriques à une réunion de plusieurs bouteilles de Leyde qui communiquent ensemble, par leurs garnitures intérieures, au moyen de tiges de métal, et par leurs garnitures extérieures au moyen d'une lame d'étain qui revêt le fond de la caisse où sont placées toutes les bouteilles. Ces appareils se chargent comme toutes les bouteilles de Leyde. On met en communication l'une des tiges de métal avec la machine électrique, et la surface extérieure avec le sol. Pour juger de la charge de la batterie, on adapte un petit pendule électrique au conducteur de la machine électrique. Au commencement de l'expérience, le pendule est en repos parce que toute l'électricité qui arrive est dissimulée aussitôt par l'effet de la batterie; mais peu à peu il s'élève, et l'on juge des diverses charges, et par conséquent des diverses degrés de tension de l'intérieur des batteries, par l'angle d'écart. On a observé que, pour une épaisseur de verre constante, la force de la batterie croît proportionnellement à l'étendue de la surface; ainsi, cinq

Batteries électriques. Fig. 595.

mètres carrés condensent cinq fois plus d'électricité qu'un seul. La décharge d'une batterie de cette force agit avec une telle énergie sur l'économie animale, qu'il est nécessaire de prendre des précautions dans son emploi.

Il existe encore un autre mode de batterie électrique plus simple encore que les précédentes. On prend plusieurs plaques de verres armées d'une feuille de métal sur les deux faces A, B, A', B', etc., que l'on place parallèlement les unes aux autres, en faisant communiquer, au moyen de fils métalliques, la surface A de l'une avec la surface B de l'autre, et ainsi de suite. Ce système étant isolé, si la première face communique avec le conducteur d'une forte machine et la dernière avec le sol, et que l'on rompe ensuite les communications avec le conducteur et le sol au moyen de tiges isolantes, on a une distribution de l'électricité comme dans la charge par cascade, dont nous allons parler.

Charge par cascade. 2078. On peut employer comme batterie électrique plusieurs bouteilles de Leyde réunies de la manière suivante : la première est suspendue par son crochet au conducteur d'une machine électrique; le crochet d'une seconde bouteille est passé dans un anneau fixé au fond de la première, et en communication avec sa garniture extérieure, et ainsi de suite, de sorte que l'armature extérieure de l'une est en communication avec la surface intérieure de l'autre. La description seule de cet instrument indique comment tout ce système peut se charger : on dit alors que l'on charge par *cascade*. On conçoit, et l'expérience le prouve, que la décomposition des électricités naturelles doit s'affaiblir avec rapidité à mesure que l'on s'éloigne de la première bouteille ; de sorte que, lorsqu'il y en a un grand nombre, les dernières n'ont qu'une charge très faible. Quand on veut décharger tout ce système, on n'a qu'à mettre en communication le crochet de la première avec l'armature extérieure de la dernière. D'après ce mode d'arrangement, on n'obtient que l'effet dû à la décharge des électricités propres à la première et à la dernière, attendu que celles des bouteilles intermédiaires s'effectuent sans produire aucun effet apparent. Il n'en serait plus de même si l'on détachait toutes les bouteilles et que l'on mît en communication, d'une part toutes les armatures extérieures, et de l'autre les surfaces intérieures. Nous devons ajouter

que, pour décharger les batteries électriques, il faut prendre les plus grandes précautions. On peut le faire très facilement au moyen de l'excitateur à deux branches (2057).

CHAPITRE V.

DES EFFETS DE L'ÉLECTRICITÉ.

Des différents effets dus au passage instantané de l'électricité.

2079. Maintenant que nous avons donné la description des appareils propres à développer et à accumuler de l'électricité, à constater sa présence, à déterminer sa nature ; que nous avons exposé les lois des forces électriques, il nous reste à décrire les effets que l'électricité peut produire par son passage instantané à travers les corps pondérables. On les classe ordinairement en trois ordres : effets physiques, chimiques et physiologiques, que nous allons étudier.

§ I. *Effets physiologiques.*

2080. L'électricité paraît favoriser dans les plantes la circulation de la sève. M. Jalabert, en électrisant des oignons de jacinthe et de jonquille ; Mimbray, en électrisant des myrtes, observèrent une végétation beaucoup plus rapide.

Le corps de l'homme est un bon conducteur.

Le corps des animaux, et de l'homme en particulier, conduisant assez bien l'électricité, principalement par les liquides dont il est pénétré, peut remplir facilement, relativement à l'électricité, le rôle de tout conducteur. Ainsi, lorsqu'une personne communiquant avec le réservoir commun est en présence d'une source d'électricité, son corps doit être chargé, par influence, de fluide contraire ; et s'il s'approche par quelque point du conducteur d'une machine en activité, il en tire des étincelles.

Bain électrique.

On nomme bain électrique la situation d'un homme que l'on charge d'une grande quantité d'électricité sans qu'elle puisse s'échapper. On obtient cet effet en plaçant le sujet de l'expérience sur un tabouret soutenu par des pieds de verre,

et le faisant communiquer avec la machine électrique. Dans cet état, on peut dire que le corps de l'homme se comporte comme le ferait un autre conducteur : l'électricité est tout entière à sa surface ; elle produit la répulsion des cheveux et des poils, qui semblent se hérisser et qui se dirigent vers les corps qu'on leur présente. Cette situation, continuée pendant quelque temps, paraît exciter fortement toutes les fonctions, et surtout la transpiration ; il en résulte fréquemment des céphalalgies, des agitations et de l'insomnie. Du reste, les symptômes sont extrêmement variables chez les différents individus.

Électrisation par les pointes. On obtient un effet connu sous le nom d'*électrisation par les pointes*, en approchant une pointe plus ou moins aiguë des différentes parties du corps d'un homme actuellement électrisé. L'action de ces pointes produit la sensation d'un vent frais ou d'un léger picotement, quand elle n'est pas très acérée et qu'on l'approche beaucoup.

Électrisation par étincelle. On donne le nom d'*électrisation par étincelle* à l'action qui consiste à approcher un conducteur arrondi des différentes parties du corps électrisé ; les étincelles plus ou moins fortes que l'on obtient produisent un sentiment de piqûre, ou une douleur pongitive, ou même, en les multipliant vers le même lieu, une véritable inflammation de la peau. Lorsqu'on les dirige sur des organes musculaires, et particulièrement sur les membres, chaque étincelle produit des contractions subites et involontaires.

Commotions électriques. C'est au moyen de la bouteille de Leyde qu'on obtient des commotions électriques. Il faut pour cela faire servir les organes du corps de conducteurs entre l'intérieur et l'extérieur de cette bouteille, et par conséquent les faire traverser tout-à-coup par une très grande quantité de fluide électrique. Il paraît que, dans cette circonstance, les organes de l'économie présentent en quelque sorte un conducteur interrompu ; car il en résulte non seulement une secousse générale, mais encore des chocs particuliers, qui se font principalement sentir dans les articulations. Une très faible étincelle de cette nature, tirée avec le bout du doigt, fait éprouver un choc dans l'articulation de la troisième phalange avec la seconde. Une plus forte peut faire éprouver des chocs dans les poignets, les coudes, les épaules, et même la poitrine. Ce

genre d'étincelle produit en même temps des contractions musculaires, d'où résulte la flexion subite des membres; ce que l'on doit attribuer à la prédominance générale des fléchisseurs sur les extenseurs.

Si, plusieurs personnes se tenant par les mains à la suite les unes des autres, la première prend la bouteille chargée par la face extérieure, et que la dernière vienne à toucher le bouton de la tige, toutes éprouvent la même commotion; c'est ce qu'on appelle *faire la chaîne*. On peut juger ainsi de la variété des effets électriques produits sur les divers individus. La décharge d'une batterie ordinaire suffit pour asphyxier et peut-être occasionner des lésions dans l'organisme; une batterie de plusieurs mètres carrés tuerait infailliblement. La charge secondaire, qui se forme après la première décharge d'un condensateur puissant, est même dangereuse; il importe donc, pour éviter tout accident, de laisser pendant quelque temps une communication métallique entre les deux garnitures d'une batterie déchargée.

A l'époque de la découverte des machines électriques et de la bouteille de Leyde, on a beaucoup espéré de l'emploi de ces énergiques moyens dans le traitement des maladies; mais l'expérience n'a pas réalisé toutes ces espérances, et l'on préfère généralement aujourd'hui l'électricité voltaïque.

On peut, avec des batteries qui ne sont pas très puissantes, tuer des oiseaux, des lapins, et même des animaux de plus grande taille. Ils tombent subitement, véritablement foudroyés, et l'examen anatomique de ces animaux n'indique point de lésions constantes et toujours appréciables; mais comme ils éprouvent des convulsions quand le choc est trop faible pour les tuer, on peut conclure de là que l'électricité agit particulièrement sur le système nerveux.

§ II. *Des effets physiques de l'électricité.*

Lorsque l'électricité traverse l'atmosphère qui environne des conducteurs chargés, elle peut s'y répandre en aigrettes lumineuses accompagnées d'un petillement particulier.

2081. La première condition pour que la lumière électrique se produise, c'est le mouvement des fluides électri- Lumière électrique; conditions

pour qu'elle se produise. ques ou la rupture de leur équilibre; cette condition n'est pas la seule, il faut encore que la tension des fluides qui détermine leur mouvement ait une intensité suffisante; ainsi, l'électricité d'une machine ordinaire ne donne point de lumière appréciable quand elle s'écoule dans le sol par un réservoir de métal, tandis que Van Marum a montré que la puissante machine du musée de Teyler peut environner d'une auréole brillante un fil de fer de plus de 15 mètres de long, communiquant avec le sol. La tension nécessaire à la production de la lumière dépend de l'état, de la forme et de la conductibilité du milieu dans lequel les fluides électriques doivent se mouvoir.

La distance à laquelle un corps électrisé peut fournir une étincelle dépend de l'intensité de son électrisation, de la conductibilité de sa substance, de l'étendue et de la forme de sa surface; pour que l'étincelle éclate, il faut, dans tous les cas, que la tension de l'électricité puisse vaincre la pression de l'air. Les corps munis de pointes ou d'angles saillants répandent sous de faibles tensions l'électricité dont ils sont chargés; le fluide se dissipe spontanément sous forme d'aigrettes lumineuses qui brillent dans l'obscurité. Dans les corps arrondis, il faut de puissantes charges pour que l'électricité parte d'elle-même; mais si alors on présente un conducteur communiquant avec le réservoir commun, alors il s'exerce une action par influence qui produit le déplacement et une accumulation telle d'électricité, que l'étincelle jaillit dès que la pression de l'air est vaincue. Ces étincelles pourront se porter à des distances plus ou moins considérables, suivant le degré de tension de l'électricité dans les conducteurs et l'étendue de leur surface; c'est ce que l'on nomme la *distance explosive*. On la mesure au moyen de l'électromètre de Lannes, qui consiste en deux boules de cuivre dont on mesure la distance par une échelle, et dont l'une communique avec les conducteurs chargés, pendant que l'autre communique avec le réservoir commun.

Distance explosive. Électromètre de Lannes.

L'étincelle marche en ligne droite dans les petits intervalles; mais lorsqu'elle se porte à de grandes distances, elle décrit des angles plus ou moins marqués, comme on peut l'observer dans les éclairs.

Moyen de

Pour multiplier les étincelles que donne un appareil élec-

trique, il suffit de multiplier les solutions de continuité du corps conducteur; au moyen duquel le fluide électrique s'écoule dans le sol. On a basé sur ce principe tous les jeux de la lumière électrique. Pour qu'elle se produise, il faut agir dans l'obscurité; elle a une couleur bleuâtre particulière. multiplier les étincelles électriques.

On peut former avec des grains de métal enfilés dans de la soie, et maintenus par des nœuds à quelques millimètres de distance, des chaînes, des guirlandes ou des dessins, qui paraissent resplendissants de feu pendant tout le temps que l'on tourne la machine avec laquelle ils communiquent. Entre le dernier grain et l'avant-dernier, la lumière paraît au même instant qu'entre le premier et le second, tant est rapide la communication de l'électricité dans toute la longueur de la chaîne.

On nomme *tubes étincelants*, de petites losanges de feuilles d'étain que l'on colle sur le verre en approchant leurs pointes à de très petites distances l'une de l'autre; l'étincelle jaillit au même instant entre toutes ces losanges et le tube où le matras paraît illuminé dans toute sa longueur. Tubes étincelants. Fig. 596.

On fait le *carreau étincelant* en collant sur un carreau de verre de petites bandes d'étain communiquant les unes avec les autres, de manière à former un conducteur continu depuis le haut du verre jusqu'en bas; et si, avec un instrument tranchant, on forme le long de ce conducteur de petites solutions de continuité suivant les contours d'un dessin quelconque, ce dessin paraîtra lumineux dans l'obscurité, en faisant passer un courant électrique d'un bout à l'autre de ce conducteur d'étain. Fig. 597.

Le carreau magique a une autre disposition : l'une de ses faces est recouverte d'une feuille d'étain, et l'autre d'une espèce de vernis contenant beaucoup d'*aventurine;* l'électricité s'accumule par dissimulation, et quand l'étincelle part, on voit sur la surface aventurinée des traits de feu qui serpentent dans tous les sens.

2082. Si l'on fait passer des étincelles électriques d'un conducteur à un autre à travers un espace vide, on observera dans l'obscurité une lumière occupant exactement tout l'espace vide. Si cet espace est considérable, cette lumière est pâle; s'il est très étroit, elle brille d'un plus grand éclat. On De la lumière électrique dans le vide.

emploie quelquefois pour faire cette expérience, un vase de forme elliptique appelé *œuf électrique* ou *œuf philosophique*; à l'une de ses extrémités il porte un tube à robinet, et à l'autre une tige à bouton passant dans une boîte à cuir. Quand le vide est fait aussi parfaitement qu'il soit possible, l'électricité passe librement en remplissant de lumière toute la capacité du vase; quand on laisse entrer un peu d'air, la lumière du vase devient moins diffuse, elle se resserre et forme entre les deux boutons *b* et *b'* des arcs de couleur pourpre; une quantité d'air un peu plus grande donne encore moins de diffusion à la lumière, et ainsi de suite jusqu'au moment où le fluide ne peut plus s'écouler qu'en jaillissant d'un bouton à l'autre sous forme d'étincelles.

Œuf électrique. Fig. 598.

Comme, dans les expériences précédentes, nous ne pouvons faire un vide parfait, même à l'aide des meilleures machines pneumatiques, on a cherché à opérer dans des conditions plus rigoureuses. On sait que le vide barométrique est le plus exact que nous puissions obtenir : depuis long-temps Picard avait remarqué que, dans l'obscurité, le vide du baromètre devient lumineux lorsqu'on fait osciller la colonne de mercure. Cavendish imagina de faire un double baromètre, de manière que l'électricité communiquée à l'une des cuvettes fût obligée de traverser le vide pour aller sortir par l'autre cuvette et s'échapper dans le sol. Dans ces conditions, l'électricité présente encore les mêmes phénomènes lumineux; elle remplit de lumière tout l'espace qu'elle traverse. Pour expliquer ces faits, on peut admettre encore que le vide barométrique lui-même contient de la vapeur de mercure, et qu'on peut encore attribuer la lumière à la chaleur que développe la condensation subite des fluides rares que contiennent ces vides toujours imparfaits. Les couleurs de la lumière électrique sont très changeantes, et la cause de ces différences est très obscure; on sait seulement que ces changements dépendent de la force de l'étincelle, de la nature et de la pression du gaz qu'elle traverse. Il y a des gaz qui donnent des teintes rougeâtres, d'autres en donnent de jaunes, de bleues, de violacées, etc.

Fig. 599.

Effets calorifiques.

2083. Si l'on dispose certains corps dans le trajet de l'électricité lors de la décharge d'une batterie électrique, on remarque des effets qui exigent ordinairement une tempéra-

ture très élevée, telle que la fusion ou l'oxidation de plusieurs métaux. Pour exécuter ces observations, on emploie communément un instrument connu sous le nom d'*excitateur universel*. Il se compose d'une petite table de bois, isolée par des pieds de verre; à chacune de ces extrémités, et un peu au-dessus, est disposée une tige métallique terminée par deux boules, et mobile en son milieu autour d'un axe horizontal. C'est entre les deux tiges que l'on place le corps à éprouver, soit en l'attachant de part et d'autre à leurs extrémités voisines, soit en le posant sur la table et abaissant les tiges pour qu'elles puissent le toucher. Les deux tiges sont ensuite mises en communication, l'une avec la garniture extérieure du condensateur par une chaîne conductrice, l'autre avec le système de la garniture intérieure à l'aide de l'excitateur ordinaire.

Excitateur universel. Fig. 600.

Un fil de fer de petite dimension et de longueur convenable, fixé entre les deux branches de l'excitateur universel, devient incandescent lors de la décharge d'un condensateur, brûle et se disperse en une infinité de petits grains à l'état d'oxide. Un fil d'or, dans les mêmes circonstances, est volatisé en poudre violette qui tache les objets voisins.

Une bande étroite de feuille d'étain de 10 centimètres de longueur est volatisée par une batterie électrique; la vapeur s'oxide et forme de longs filaments qui flottent dans l'air. Tous les métaux peuvent ainsi s'échauffer, rougir, se fondre et souvent s'oxider; mais en les prenant de même longueur et de même diamètre, des charges égales ne produisent pas sur tous de mêmes effets; ceux qui sont plus mauvais conducteurs, comme le fer et le platine, éprouvent à égalité de dimensions de plus grands effets de chaleur que l'or et le platine, qui sont les meilleurs conducteurs.

Les fils de soie dorés présentent un phénomène qui montre avec quelle instantanéité s'exerce l'action de l'électricité sur des conducteurs électriques: l'or qui les couvre est volatilisé sans que le fil de soie soit rompu. Pour faire cette expérience, on appuie sur le fil une feuille de papier blanc sur laquelle on voit, après le choc, une large tache brune ou violette. On se sert de cette propriété pour faire des empreintes électriques.

Les fortes décharges électriques font éprouver aux sub-

stances métalliques des effets remarquables : si le métal est peu fusible, on n'aperçoit après l'action qu'un cercle de fusion de 2 à 4 millim. de diamètre; mais s'il est très fusible, on aperçoit autour du cercle central jusqu'à trois anneaux de fusion concentriques, et séparés par des intervalles sensibles.

Quand l'étincelle électrique éclate dans un liquide, elle brille comme dans l'air; presque toujours le liquide est lancé de toutes parts avec une grande force. Dans les gaz, l'étincelle produit une expansion si grande et si instantanée, qu'elle peut lancer une petite balle au moyen du *mortier électrique*.

Mortier électrique. Fig. 601.

Kinnersley, qui observa le premier ce phénomène remarquable, inventa aussi un appareil pour en mesurer l'intensité. C'est un tube en verre fermé et armé par les deux bouts (fig. 602); l'étincelle part entre les deux bouts $b\,b'$, et un liquide qui s'élève en même temps dans le tube latéral $t\,t'$ donne la mesure de l'expansion. Cet appareil se nomme le *thermomètre de Kinnersley*.

Fig. 602.

Les mauvais conducteurs sont percés ou brisés par la décharge d'une forte batterie; une pierre plate, de plusieurs lignes d'épaisseur, est percée comme le verre mince. Un cylindre de bois, de 50 à 80 millimètres de diamètre et 13 millimètres d'épaisseur, peut être fendu en éclats par une décharge qui passe dans le sens des fibres.

A la surface de quelques substances, l'étincelle laisse une traînée lumineuse qui brille pendant plusieurs secondes, et quelquefois pendant plus d'une minute. Cette espèce de phosphorescence est rouge et violacée sur la craie; elle est verdâtre sur le sucre, sur certains spaths calcaires cristallisés et sur le grès de Fontainebleau.

L'étincelle électrique étant accompagnée d'un développement considérable de chaleur, peut enflammer facilement les corps combustibles. Si l'on place de l'éther ou de l'alcool dans une éprouvette, ils pourront s'allumer facilement au moyen d'une étincelle électrique. Tous les mélanges gazeux inflammables détonent aisément par ce moyen; c'est sur cette propriété qu'est fondé le *pistolet de Volta*. Il consiste en un vase de métal ou de cristal épais, dans lequel on mêle un peu de gaz hydrogène à l'air atmosphérique qu'il contient

Pistolet de Volta.

naturellement, et que l'on ferme ensuite avec un bouchon de liége. Dans l'intérieur de ce vase se trouve un petit conducteur de cuivre isolé au moyen d'un tube de verre, qui se termine en dehors par une petite boule de cuivre et qui présente extérieurement une petite solution de continuité. Il suffit alors de la plus petite étincelle électrique pour produire la combinaison de l'hydrogène avec l'oxigène, et une forte détonation qui chasse le bouchon avec violence.

Volta a fait une heureuse application du pouvoir qu'a l'étincelle électrique d'enflammer un mélange gazeux, pour fabriquer l'eudiomètre qui porte son nom.

Cause du développement de la chaleur.

2084. Il est assez difficile d'assigner la véritable cause du développement de la chaleur qui accompagne les décharges électriques et qui produit les différents effets que nous avons signalés. On l'a attribuée à la compression subite qui résulte du passage rapide des fluides électriques sur les corps qu'ils traversent. On peut prouver expérimentalement qu'il y a déplacement d'air lorsque l'étincelle électrique éclate entre deux conducteurs voisins. L'appareil pour cette démonstration se compose d'un fort tube de verre vertical, fermé à ses deux extrémités par des bouchons que traversent des tiges métalliques terminées intérieurement par deux boules en regard l'une de l'autre à une distance convenable; un autre petit tube, aussi vertical, communique par le bas avec le grand, et s'ouvre librement dans l'atmosphère; enfin, un liquide coloré occupe le fond de l'appareil, et s'élève dans le tube latéral jusqu'à une certaine hauteur; quant à la partie supérieure du gros tube, elle contient de l'air qui entoure les deux boules. Lorsqu'on met les parties extérieures des deux tiges respectivement en communication avec les garnitures d'un condensateur, la décharge s'opère entre les boules par une étincelle, et l'on remarque que le niveau du liquide s'élève momentanément dans le tube latéral. L'air est donc déplacé lorsque deux masses d'électricités contraires se portent l'une vers l'autre pour se neutraliser à travers le fluide. Ce déplacement brusque fait naître une compression locale qui, se propageant dans les couches éloignées, occasionne le bruit de l'explosion; et c'est à la chaleur dégagée par cette compression qu'on attribue la lumière de l'étincelle. Fig. 603.

Priestley a observé que la décharge d'une puissante batterie électrique opérée par une grande chaîne de métal fait séparer de cette chaîne une poudre noirâtre qui tache les corps voisins.

Transport de particules métalliques par l'électricité.

2085. Fusinieri a constaté qu'une étincelle électrique provenant d'une forte décharge et qui part d'un globe de laiton ou d'argent emporte avec elle des particules métalliques. Si le globe d'argent est séparé de la boule de l'excitateur (2083) par une lame de cuivre placée obliquement, l'argent emporté par l'étincelle perfore la lame de cuivre sur une épaisseur qui peut avoir plusieurs centimètres, se loge en partie dans ce canal oblique, et le reste pénètre dans la boule de l'excitateur. L'or est transporté de la même manière à travers une lame d'argent. Une forte étincelle qui éclate entre deux boules de métaux différents, d'argent et de cuivre par exemple, entraîne du cuivre sur l'argent, et réciproquement de l'argent sur le cuivre; chaque particule métallique transportée forme deux cavités opposées, l'une dans la boule d'où elle est détachée, l'autre dans la boule qu'elle pénètre; car chaque groupe de cavités correspondantes contient le même métal en fusion.

Il résulte de ces faits, que l'étincelle produite par une décharge entre deux corps conducteurs entraîne avec elle des particules détachées de ces corps, lesquelles traversent l'air à l'état d'incandescence et de fusion, et brûlent à leur surface si elles sont facilement oxidables. C'est sans doute l'incandescence de la combustion de ces particules transportées qui occasionnent la lumière vive de l'étincelle dans ces circonstances et ces diverses couleurs.

Ces expériences diverses concourent à prouver que l'électricité instantanément accumulée dans de certaines parties d'un corps solide tend à détruire la force d'agrégation ou l'attraction moléculaire. On remarque également qu'un liquide électrisé doit paraître plus fluide et éprouver une action capillaire plus faible de la part des parois solides avec lesquelles il est en contact; c'est en effet ce que confirme l'expérience suivante. Si l'on suspend par une chaîne au conducteur de la machine électrique un vase métallique rempli d'eau et muni d'un ajutage capillaire par lequel le liquide ne s'échappe que goutte à goutte; aussitôt qu'on fait

tourner le plateau, les gouttes diminuent d'abord de grosseur et se succèdent plus rapidement ; puis l'écoulement se transforme en une veine continue et très fine ; la quantité d'eau fournie par l'orifice reste d'ailleurs la même dans tous les cas, et ne dépend que de la hauteur du liquide dans le vase. Cet effet est évidemment dû à une diminution, tant de la viscosité de l'eau que de l'attraction capillaire exercée sur le liquide par les parois de l'orifice.

Perce-carte. Fig. 604.

2086. Si l'on met entre deux pointes métalliques fixées aux deux branches isolées d'un excitateur métallique un corps non conducteur en plaque mince, il est percé si la décharge a lieu entre les deux pointes à travers la lame isolante. Si, par exemple, on place une carte obliquement entre deux pointes métalliques, de telle manière que l'une soit à gauche et l'autre à droite, lors d'une décharge entre ces pointes la carte est percée, mais non au milieu. Dans l'air ordinaire, le trou se fait toujours près de la pointe résineuse, et dans l'air raréfié sous la cloche de la machine pneumatique, il s'en éloigne pour se rapprocher de plus en plus de la pointe vitrée.

Ce fait a été constaté par M. Trémery ; il indique une différence dans l'action que les deux électricités exercent sur l'air pour se porter l'une vers l'autre. Cette différence est déjà indiquée par le fait suivant : lorsqu'une pointe laisse échapper de l'électricité positive, on aperçoit dans l'obscurité une aigrette lumineuse, tandis qu'on n'aperçoit qu'une auréole, ou même un simple point lumineux lorsque c'est de l'électricité négative qui se dissipe.

Si on veut percer une lame de verre par la décharge électrique, il est nécessaire de mettre à l'extrémité d'une des pointes une goutte d'un liquide conducteur, une goutte d'huile par exemple.


Vitesse de l'électricité.

2087. Si une décharge électrique s'opère dans un lieu très obscur où des corps sont en mouvement, ces corps éclairés un moment par la lumière électrique paraissent complétement immobiles, quel que soit le mouvement réel dont ils soient animés ; cette apparence assigne une durée inappréciable au phénomène de l'étincelle électrique. Si l'on touche l'une des garnitures d'une bouteille de Leyde avec un fil métallique faisant un grand nombre de circonvolutions et

terminé par une boule métallique placée très près de l'autre garniture, on ne peut apprécier aucun intervalle de temps appréciable entre le moment du contact et l'apparition de l'étincelle à l'autre extrémité du fil. Ces expériences nous montrent combien est rapide la vitesse de transmission de l'électricité; long-temps on a essayé sans succès de la mesurer. M. Wheatstone, au moyen d'un appareil très ingénieux, est parvenu à la déterminer, et il a conclu de ses expériences que l'électricité se transporte sur un fil de laiton de $0^m,002$ de diamètre avec une vitesse d'environ 46,000 myriam., ou de 115,000 lieues par seconde. Cette vitesse surpasse celle de la lumière dans le vide planétaire, qui est de 70,000 lieues, ou 27,300 myriam.

§ III. *Effets chimiques de l'électricité.*

2088. Nous avons vu qu'un grand nombre de combinaisons chimiques pouvaient être favorisées par les décharges des étincelles électriques; ainsi sous cette influence l'hydrogène se combine à l'oxigène. Plusieurs métaux peuvent être également oxidés; et des corps dont l'affinité est peu puissante, comme l'azote et l'oxigène, peuvent même s'unir sous l'influence de décharges continues d'étincelles électriques.

Si l'étincelle électrique est une force qu'on emploie souvent pour favoriser les combinaisons chimiques, l'électricité est un agent plus puissant peut-être de décomposition qui, entre les mains de plusieurs physiciens, a conduit aux plus importantes découvertes. Nous les exposerons en parlant de la pile voltaïque; qu'il nous suffise d'ajouter ici que lorsqu'on place sur une lame de verre une bande de papier coloré par du sirop de violette, et qu'on fait communiquer une des extrémités avec le conducteur positif de la machine, et l'autre par un fil avec les coussins, le papier est rougi du côté du conducteur positif, et verdi de l'autre côté. Cette expérience démontre que l'électricité en parcourant les bandes de papier humide et coloré a décomposé les sels qu'elle renferme; que les acides résultant de cette décomposition ont été portés vers le conducteur positif, et les alcalis vers l'extrémité opposée. On sait encore qu'en faisant passer des étincelles électriques à travers certains gaz, on parvient à

les décomposer : l'*ammoniaque*, l'*acide sulfhydrique* peuvent être complétement décomposés ; l'acide carbonique est décomposé en oxide de carbone et en oxigène, le gaz nitreux en acide nitrique et en azote. L'expérience démontre qu'un courant électrique jouit de la propriété de décomposer les sels ; en effet, si on prend deux fils d'argent terminés par des pointes aiguës, et qu'après avoir entouré les fils avec de la cire jusqu'aux extrémités, on les met en communication avec les deux conducteurs d'une machine de Nairne, et qu'on plonge les pointes dans une dissolution de sels de cuivre, en très peu de temps on reconnaît que la pointe d'argent qui communique avec le conducteur négatif se couvre de cuivre.

Plusieurs matières organiques peuvent également être décomposées par une série d'étincelles électriques. On remplit, par exemple, d'huile ou d'éther, une petite cloche reposant sur du mercure, et dont la partie supérieure est traversée par un fil de platine qui descend jusqu'à une petite distance de la surface du mercure. En mettant le fil en communication avec le conducteur d'une machine, et le mercure en contact avec le sol, les étincelles qui passent de l'extrémité du fil au mercure décomposent le liquide ; les huiles donnent de l'hydrogène carboné, de l'hydrogène et de l'oxigène en diverses proportions.

CHAPITRE VI.

DE L'ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LA PRESSION ET PAR LA CHALEUR.

§ I. *Électricité développée par la pression.*

2089. Libes fit la première expérience qui conduisit à admettre dans la pression une cause de développement d'électricité ; voici son expérience : Il posa un disque de métal muni d'un manche isolant sur un disque de taffetas gommé ; il pressa un peu le disque contre le taffetas ; il Expérience de Libes.

le trouva alors chargé d'électricité résineuse, et le taffetas d'électricité vitrée. Cette expérience, quoique importante, n'offre pas un caractère de précision suffisant; car on peut dire que l'adhérence qui s'établit entre la surface du métal et la surface du vernis du taffetas gommé suffit pour produire un effet analogue au frottement. Mais Haüy est parvenu à développer de l'électricité dans un grand nombre de corps qui ont des surfaces lisses et polies, et dans de telles circonstances que le phénomène doit certainement être attribué à la pression et non au frottement. Par exemple, si on prend un fragment de spath calcaire à faces parallèles, si on le presse un instant entre les doigts, il acquiert une charge très sensible d'électricité vitrée; il en est de même de plusieurs minéraux parmi lesquels nous citerons la topaze, le fluorure de calcium, le mica, le quartz. L'espèce d'électricité que prennent ces substances dépend de la nature du corps qui les presse.

Expériences d'Haüy.

Haüy a découvert une propriété curieuse à la chaux carbonatée: après avoir été pressée, elle donne encore au bout de onze jours des signes d'électricité. Cette propriété a été utilisée dans l'aiguille électrique de Haüy. Cet instrument ressemble à l'aiguille ordinaire, avec cette seule différence qu'à l'une des extrémités, au lieu d'un globule de métal, se trouve adaptée une petite lame de chaux carbonatée *c c'*, que l'on électrise en la pressant entre les droits; cet électroscope, conservant très bien sa force primitive, est un des plus simples et des plus commodes pour comparer approximativement les tensions électriques des différentes substances électrisées qu'on peut lui présenter.

Aiguille électrique de Haüy. Fig. 605.

2090. M. Becquerel a étudié d'une manière spéciale les conditions du développement de l'électricité par pression; son électromètre était une balance électrique dont le fil métallique était capillaire. Par ses expériences, il est arrivé aux résultats généraux suivants: quand on presse l'un contre l'autre deux corps isolés d'une nature quelconque, ils se constituent dans deux états électriques différents; mais ils ne sortent de la compression avec de l'électricité libre qu'autant que l'un des deux n'est pas un bon conducteur. Il paraît que l'intensité de l'état électrique après la séparation dépend de la conductibilité des deux corps et de la vitesse

Des conditions du développement de l'électricité par la pression.

de séparation; car, pendant la durée de la pression, les deux couches électriques séparées étant en équilibre, cet état ne subsiste que par le seul fait de la pression; si on la diminue lentement, les électricités qui ont été séparées se combineront de nouveau avec d'autant plus de facilité que la séparation sera plus lente et que les fluides se mouveront plus facilement dans les corps : ainsi on obtient toujours une tension électrique d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide.

On peut constater l'existence de l'électricité développée par la pression sur des morceaux de liége, de caoutchouc, de moelle de sureau, tenus par des manches isolants. M. Becquerel a découvert que l'électricité développée par la pression dans le cas où la vitesse de séparation donnait le maximum d'électricité, était proportionnelle à la pression jusqu'à une certaine limite. Une autre remarque non moins importante, c'est que la chaleur a une grande influence sur le développement de l'électricité par la pression : le spath d'Islande, qui par la pression prend l'électricité positive, acquiert de l'électricité négative lorsque sa température a été suffisamment élevée. Deux corps de même nature, tels que deux morceaux de liége, de spath d'Islande, pressés, s'électrisent rarement; mais lorsque l'un d'eux est échaufé, ils se trouvent tous deux, après la séparation, dans des états électriques opposés. Si la pression dure jusqu'à ce que l'équilibre de température ait lieu, les corps séparés ne sont plus électrisés.

Pour observer les phénomènes précédents, il faut avoir soin de sécher les corps que l'on doit presser; car l'eau hygrométrique adhérente à leur surface peut agir comme corps conducteur pour recomposer les deux fluides électriques développés.

Il ne faut pas confondre le développement de l'électricité par la pression seule avec celui dû au frottement entre les corps pressés; un même corps peut se trouver chargé après l'opération d'électricités différentes dans l'un et l'autre cas. M. Péclet a démontré que l'énergie de la pression n'a pas d'influence sensible sur la quantité d'électricité développée entre les corps frottés sous cette pression continuellement active. Cette proposition semble contredire les résultats de

M. Becquerel, que l'électricité développée est proportionnelle à la pression; mais on doit remarquer que dans ces phénomènes divers le contact prolongé des corps frottés ou pressés donne lieu à une combinaison plus ou moins rapide des fluides séparés, et que les effets observés dépendent uniquement des électricités libres qui échappent à cette recomposition; or, pour mettre d'accord les deux propositions opposées, on peut admettre que la quantité de fluide neutre qui se reproduit au contact est très différente entre des surfaces frottées et des surfaces pressées.

Électricité développée par le clivage et par le choc. 2091. Lorsqu'on clive vivement dans l'obscurité deux lames de mica, ou deux lames de sulfate de chaux anhydre, il y a production de lumière; et si ces deux lames sont isolées, elles sont chargées d'électricités de nom contraire. Les deux parties d'une carte dédoublée se trouvent aussi électrisées d'une manière différente. Le choc peut encore développer de l'électricité, mais cet effet dépend sans doute de la compression qu'il occasionne dans les corps choqués; la lumière ou phosphorescence qui accompagne le choc dans l'obscurité, doit être attribuée à la réunion des deux électricités développées par la percussion.

§ II. *Électricité développée par la chaleur.*

Électricité développée dans la tourmaline. 2092. Plusieurs substances cristallines présentent des phénomènes électriques lorsqu'on élève leur température; mais ce phénomène est surtout remarquable lorsqu'on emploie un minéral connu sous le nom de *tourmaline* cristallisé en prismes hexagonaux ou triangulaires allongés. Il paraît que depuis un temps immémorial on avait remarqué dans l'Inde que ce minéral jeté dans le feu jouissait de la propriété d'attirer les corps légers. Les Hollandais, auxquels les naturels du pays montrèrent ce phénomène, furent les premiers qui le firent connaître en Europe. Quand on chauffe une tourmaline en la plongeant dans l'eau bouillante, on remarque que ses deux moitiés sont chargées d'électricités contraires. La présence des deux électricités est principalement sensible vers les deux extrémités du cristal prismatique.

Lorsque deux cristaux de tourmaline chauffés sont présentés l'un à l'autre, ils s'attirent ou se repoussent suivant

que les extrémités rapprochées sont chargées d'électricités contraires ou électrisées de la même manière. Pour démontrer ce fait, on emploie l'appareil représenté (fig. 606). Il se compose d'une plaque horizontale lestée par les boules *a* et *b*, et garnie à son centre d'une chape qui repose sur une pointe aiguë. On place sur la plaque une tourmaline échauffée, et on présente successivement à ses deux extrémités une autre tourmaline également échauffée : un des pôles de la tourmaline est attiré, l'autre est repoussé ; le sommet à trois faces possède l'électricité négative, et le sommet à six faces l'électricité positive. Fig. 606.

Le moyen précédent serait insuffisant pour démontrer les plus faibles traces de polarité électrique dans les tourmalines. On emploie alors la disposition représentée dans la fig. 607 ; l'aiguille est suspendue dans une chape de papier à l'aide d'un fil de soie sans torsion ; elle est environnée d'un cylindre de verre ouvert par les deux bouts, reposant sur une plaque métallique que l'on échauffe avec une lampe à esprit-de-vin ; l'échauffement étant très lent, la température de la tourmaline sera sensiblement représentée par celle d'un thermomètre qui serait placé dans le cylindre à la même hauteur que l'aiguille. Pour reconnaître l'espèce d'électricité qui s'est développée dans le cristal, on introduit par la partie supérieure du cylindre un corps faiblement électrisé et soutenu à l'aide d'un manche isolant, et que l'on présente aux deux extrémités de la tourmaline. Fig. 607.

Des lois suivant lesquelles se développe l'électricité dans les tourmalines.

2093. Plusieurs physiciens, parmi lesquels nous devons citer surtout Canton, Wilson, Priestley, Bergmann, Æpinius, Haüy, Becquerel, ont étudié les phénomènes électriques manifestés par la tourmaline. Ces faits, qui n'ont point encore reçu d'explication satisfaisante, peuvent se résumer ainsi :

1° Toutes les tourmalines, même celles qui proviennent du même gisement, ne sont pas également susceptibles de devenir électriques par la chaleur ; il en existe qui ne le deviennent point ; il paraît que ce sont surtout les plus longues qui sont dans ce dernier cas ; enfin, il existe des tourmalines qui ne deviennent électriques que par un échauffement rapide.

2° Pour chaque tourmaline, il y a deux limites de tem-

pératures au-delà desquelles le développement des pôles ne se manifeste pas; ces limites sont ordinairement 10° et 150°, mais elles varient avec les dimensions des tourmalines.

3° L'électricité polaire ne se manifeste que quand la tourmaline s'échauffe ou se refroidit dans toute son étendue. Quand la température reste stationnaire, toute polarité disparaît; quand on échauffe ou qu'on refroidit une des extrémités seulement, la tourmaline ne possède qu'une seule espèce d'électricité.

4° Les pôles électriques qui se manifestent par l'échauffement changent de nature quand le corps se refroidit.

5° Lorsqu'une tourmaline est électrique par la chaleur et qu'on la brise en deux ou en plusieurs fragments, chacun d'eux possède la propriété d'acquérir deux pôles par la chaleur.

6° Les tourmalines les plus électriques par la chaleur sont transparentes, et le sommet qui renferme le plus de facettes est celui qui prend l'électricité positive par le refroidissement.

Énumération des cristaux électriques par la chaleur.

2094. Nous avons dit qu'un grand nombre de cristaux peuvent donner des signes d'électricité lorsqu'on les chauffe, mais la faculté de présenter des pôles n'a été constatée que dans les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie; dans les autres, le docteur Brewster a seulement reconnu une action attractive sur les corps légers, et encore, pour ces derniers, les faits observés ne sont pas suffisants pour affirmer qu'ils étaient réellement électrisés par la chaleur. Quoi qu'il en soit, voici, d'après le docteur Brewster, la liste des cristaux électriques par la chaleur :

Diamant,	Mésotype,
Soufre,	Émeraude,
Zinc oxidé,	Topaze,
Quartz,	Tourmaline,
Carbonate de chaux,	Titane silicéo-calcaire (sphène),
Carbonate de plomb,	Acide tartrique,
Sulfate de baryte,	Acide citrique,
Sulfate de strontiane,	Tartrate de soude et de potasse,
Magnésie boratée,	Oxalate d'ammoniaque,
Chlorure de calcium,	Chlorure de potassium,
Sulfure d'arsenic,	Sulfate de soude et de magnésie,
Scolézite,	Sulfate d'ammoniaque,

Sulfate de fer,	Diopside,
Sulfate de magnésie,	Prussiate de potasse,
Mésolite,	Acétate de plomb,
Analcime,	Carbonate de potasse,
Prénite,	Bichlorure de mercure,
Axinite,	Sucre.
Grenat,	

CHAPITRE VII.

DE L'ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

§ I. *Des moyens employés pour constater l'électricité atmosphérique.*

2095. Aussitôt que l'on eut découvert les phénomènes remarquables que peut manifester l'électricité accumulée au moyen de la bouteille de Leyde et des batteries électriques, ces effets se trouvèrent si ressemblants à ceux de la foudre, qu'on ne put en méconnaître l'analogie. Cependant, ce ne fut que long-temps après que l'illustre Franklin, ayant reconnu le pouvoir des pointes de décharger à distance les corps électrisés, conçut l'espérance d'employer ce moyen pour rendre sensibles les effets de l'électricité atmosphérique; mais n'ayant pu immédiatement réaliser cette expérience, ce fut Dalibard, physicien français, qui l'exécuta. Il fit construire à Marly-la-Ville une cabane au-dessus de laquelle était fixée une barre de fer de 13 mètres de longueur, isolée dans sa partie inférieure. Un nuage orageux étant venu à passer vers le zénith de cette barre, elle donna des étincelles à l'approche du doigt, et présenta tous les autres effets qu'offrent les conducteurs électrisés par nos machines ordinaires. Cette expérience mémorable eut lieu le 10 mai 1752.

Expérience de Dalibard.

Elle fut bientôt répétée par un grand nombre d'observateurs ; mais l'appareil présentait un défaut qui en rendait l'emploi souvent incertain : la base n'était pas bien isolée, et elle se trouvait exposée à être mouillée par la pluie et à lais-

ser dissiper ainsi l'électricité. Canton imagina de remédier à ce défaut en plaçant à l'extrémité inférieure de la barre métallique, un chapeau en métal qui recouvrait le support isolant et le mettait à l'abri de la pluie. Au moyen de cet appareil perfectionné, il trouva que certains nuages sont chargés d'électricité vitrée, d'autres d'électricité résineuse; en sorte que l'électricité de l'appareil changeait souvent cinq ou six fois en une demi-heure. La pluie et la neige en tombant l'électrisaient aussi, et ces phénomènes avaient lieu l'hiver comme l'été. Pour ne pas être obligé d'aller le visiter sans cesse, et souvent sans utilité, Canton imagina d'y adapter un petit appareil extrêmement ingénieux, représenté par la fig. 608. Ce sont trois timbres T T T suspendus à une même tige métallique horizontale A B, celui du milieu T par un fil de soie, les deux autres par une chaîne métallique. De plus, le timbre T communique au sol par une autre chaîne attachée sous sa partie inférieure. Entre ces timbres pendent de petites sphères métalliques $b\,b'$ suspendues à des fils de soie. D'après cela, il est clair que, si la tige A B est mise en communication avec le conducteur vertical qui reçoit l'électricité de l'atmosphère, cette électricité se transmettra d'abord aux deux timbres extrêmes T T, par le moyen des chaînes métalliques qui les suspendent. Alors les petits globules $b\,b'$ seront attirés vers les timbres et viendront les toucher; mais, aussitôt après, ils en seront repoussés, et ils seront au contraire attirés par le timbre T communiquant au sol; ils se porteront donc vers lui, se déchargeront et iront se recharger de nouveau par le contact des timbres extrêmes; ces oscillations continuelles de petits globules feront sonner les timbres, et l'on serait ainsi averti de la présence de l'électricité. Cet appareil se nomme un *carillon électrique.*

Carillon électrique. Fig. 608.

Appareil de Franklin.

2096. Franklin imagina ensuite une disposition aussi simple qu'ingénieuse pour enlever l'électricité aux nuages. Il pensa de faire descendre l'électricité des nuages sur la terre le long de la corde d'un cerf-volant; mais Franklin ne prévoyait pas lui-même l'extrême danger auquel il s'exposait. Son cerf-volant était enlevé et il en tenait la corde à la main, mais elle ne donnait encore aucun signe d'électricité, quoique le cerf-volant fût voisin d'un nuage qui paraissait porteur de la foudre. Déjà Franklin craignait de s'être trompé dans ses

conjectures, lorsqu'enfin une petite pluie étant venue mouiller la corde et augmenter sa faculté conductrice, Franklin réussit à en tirer quelques étincelles; et il faut l'entendre lui-même raconter la joie qu'il ressentit à l'aspect de ce phénomène qu'il avait prévu. Cependant, si la corde eût été mouillée, ou si elle eût été faite d'une matière plus conductrice, il est probable que cet homme célèbre eût payé de sa vie sa témérité.

Perfectionnements de Charles et de Romas.

L'appareil de Franklin reçut bientôt d'importantes modifications. Charles remplaça la corde du cerf-volant par une corde métallique filée; et pour que l'observateur ne fût pas exposé à des décharges imprévues, l'extrémité inférieure de la corde se terminait par un cordon de soie de 2 à 3 mètres de longueur, au moyen duquel le cerf-volant et le fil étaient isolés. De plus, au lieu d'en tirer des étincelles avec le doigt, ce qui fait que l'observateur reçoit lui-même la décharge, Romas imagina de les tirer à l'aide d'un conducteur métallique communiquant au sol par une chaîne, et tenu à la main par l'intermédiaire d'un manche isolant.

Les effets qu'on produisit avec cet appareil ainsi disposé furent remarquables. Voici comme M. de Romas s'exprime dans une lettre à Nollet: « Imaginez-vous voir des lames de feu de 9 à 10 pieds de longueur et d'un pouce de grosseur, qui faisaient autant et plus de bruit que des coups de pistolet. En moins d'une heure j'eus certainement trente lames de cette dimension, sans compter mille autres de 7 pieds et au-dessus. Mais ce qui me donna le plus de satisfaction dans ce nouveau spectacle, c'est que les plus grandes lames furent spontanées, et que, malgré l'abondance du feu qui les formait, elles tombèrent constamment sur le corps conducteur le plus voisin. Cette constance me donna tant de sécurité, que je ne craignais pas de provoquer ce feu avec mon excitateur dans le même temps que l'orage était assez animé; et, lorsque les branches de verre de cet instrument eurent seulement 2 pieds de longueur, je conduisis où je voulus, sans sentir à ma main la plus petite commotion, des lames de feu de 6 ou 7 pieds, avec la même facilité que je conduisais des lames qui n'avaient que 7 ou 8 pouces. »

Moyens de reconnaître

2097. On peut, au moyen d'un électromètre dont la garniture est surmontée d'un conducteur plus ou moins long,

L'électricité dans l'atmosphère sans nuages.

terminé en pointe, s'assurer de la présence de l'électricité dans l'atmosphère sans nuages. Si on élève cet électromètre en rase campagne à quelques mètres au-dessus du sol, il donne des traces d'électricité positive lorsque l'air est sec, et tantôt positive et tantôt négative dans les temps de pluie; dans ces dernières circonstances, il convient de fixer à la tige de l'électromètre une couverture en laiton de forme conique, et d'une grandeur suffisante pour que la garniture et la partie inférieure du conducteur soient préservées de la pluie. Si on veut opérer dans un cabinet, voici la disposition qu'on adopte. On réunit par un fil conducteur la garniture de l'électromètre avec une tige métallique isolée, terminée en pointe et fixée à la partie supérieure de l'édifice dans lequel on se trouve. Il est prudent de fixer, à une assez petite distance de la partie inférieure de cette tige isolée, une boule métallique dont la communication avec la terre soit bien établie, et sur laquelle cette tige puisse se décharger d'une trop grande quantité d'électricité. La caisse de l'électromètre doit être petite, afin de diminuer le plus possible la masse d'air intérieure. Les pendules doivent être très mobiles, et peuvent être formés de deux boules de sureau suspendues à des fils métalliques très déliés, ou simplement de deux pailles conductrices. L'écartement de ces pendules doit être observé à distance au moyen d'une lunette mobile sur un limbe horizontal. La force de la charge de l'instrument se déduit de l'amplitude de l'écartement.

Méthode de Saussure.

2098. Saussure employait un autre instrument pour découvrir l'électricité atmosphérique. Il se servait d'une boule creuse de métal attachée au bout d'une chaîne, dont l'autre extrémité pouvait glisser le long de la tige de l'électromètre; il lançait avec force cette boule dans l'atmosphère, la chaîne se tendait, et, par suite du mouvement ascensionnel, son anneau inférieur abandonnait la tige. L'instrument restait alors chargé d'électricité de même nom que celle disséminée dans l'atmosphère. Cette charge provenait évidemment d'une décomposition de fluide neutre produite par l'influence de l'électricité atmosphérique lors de l'ascension de la boule.

§ II. *Des lois et des causes de l'électricité atmosphérique.*

2099. On a constaté par les moyens précédents que : *l'électricité disséminée dans l'air sec est toujours positive; elle croît en intensité à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère.* MM. Becquerel et Breschet ont mis hors de doute cette loi en appliquant sur une grande échelle le procédé de Saussure. Leur observation fut faite par un temps serein, sur un des plateaux du mont Saint-Bernard. L'appareil se composait d'un fil de soie recouvert de clinquant, ayant 80 mètres de longueur et déroulé sur un morceau de taffetas gommé de plusieurs mètres carrés de surface, tendu horizontalement; un des bouts de ce fil embrassait par un nœud coulant la tige de l'électromètre, et l'autre extrémité était attachée au fer de lance d'une flèche. Cette flèche, lancée verticalement avec toute la force de l'arc, emportait le fil dont le nœud inférieur abandonnait la tige. Or, durant cette ascension, on voyait les pailles de l'électromètre s'écarter progressivement et finir par frapper fortement les parois de la cloche. Loi de l'électricité atmosphérique.

2100. Voici encore quelques résultats généraux qui ont été déduits d'un grand nombre d'expériences par plusieurs observateurs. L'électricité de l'air serein est plus forte en hiver qu'en été; chaque jour, par un ciel serein, l'électricité de l'air a deux *maxima* et deux *minima*; le premier maximum a lieu de 7 à 9 heures du matin, et le second de 7 à 9 heures du soir ; le premier minimum vers 4 heures du matin, et le second de 5 à 10 heures du soir; enfin la tension électrique aux deux maxima et aux deux minima va en croissant de juillet à janvier, et en décroissant de janvier à juillet. Ces variations périodiques proviennent probablement et de la production de l'électricité et de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère, et enfin des décharges accidentelles de l'atmosphère par les pluies et les orages : dans les temps d'orage, l'électricité de l'air change à chaque instant de signe et d'intensité comme nous allons bientôt l'étudier en détail en parlant des orages et des principaux phénomènes qui les accompagnent. Variations de l'électricité atmosphérique.

Nous devons ajouter que les électromètres disposés pour recueillir l'électricité de l'atmosphère ne donnent aucun résultat dans les lieux bas et abrités, tels que les cours des

maisons, les rues des villes, les vallées étroites. En rase campagne ou sur les plateaux, il faut élever les appareils à deux mètres au moins au-dessus du sol pour obtenir un écartement sensible des pailles. Saussure dans les Alpes, et M. Becquerel sur les roches de l'Auvergne, ont constaté que les signes de l'électricité atmosphérique, très sensibles au-dessus des sommets des monts, diminuent rapidement sur leurs versants, et sont nuls en général aux pieds des montagnes.

Causes de l'électricité atmosphérique.

2101. Nous avons déjà précédemment indiqué les principales causes du développement de l'électricité; nous reviendrons encore sur ce sujet important; mais nous devons étudier ici la principale cause de l'électricité atmosphérique, qui est l'évaporation de l'eau. Si l'on jette dans un creuset rougi au feu une dissolution aqueuse saline ou de l'eau de rivière, et que l'on mette en contact avec la vapeur qui se dégage un fil métallique uni au plateau collecteur d'un électromètre condensateur, on reconnaît que cette vapeur est chargée d'électricité positive.

Les expériences de M. Pouillet ont démontré que l'eau pure en s'évaporant ne donne pas de signes sensibles d'électricité, mais qu'il y a au contraire de l'électricité libre développée, lorsque l'eau soumise à l'évaporation contient un sel en dissolution; la vapeur étant chargée d'électricité positive. Or, l'eau de rivière n'est jamais pure, on peut donc regarder son évaporation, à la surface de la terre, comme la source de l'électricité répandue dans l'atmosphère.

M. Pouillet avait encore signalé une autre cause au développement de l'électricité atmosphérique, c'était la végétation. Il isola des végétaux dans une caisse de verre, il observa que la caisse donnait après un certain temps des signes d'électricité négative, et que conséquemment le gaz acide carbonique formé était positif. On savait d'ailleurs que, lors de la combustion du charbon, l'acide carbonique formé est toujours électrisé positivement, tandis que le charbon l'est négativement. En comparant ces deux faits, on était en droit de conclure que c'est la combinaison du carbone avec l'oxigène qui produit de l'électricité libre pendant la végétation. Mais on objecte à cette conclusion que ce n'est pas à la surface extérieure du parenchyme que cette combinaison s'o-

père, mais bien dans son intérieur, en sorte que l'acide carbonique formé restant dans un contact prolongé avec le carbone en excès avant de se dégager, les électricités développées par la formation du gaz doivent se réunir et tout signe d'électricité libre disparaître. Mais on peut d'ailleurs attribuer l'électricité manifestée par la végétation à l'évaporation de l'eau que contiennent les végétaux et qui se dissipe continuellement dans l'atmosphère. Ainsi, en définitive, on ne devrait attribuer qu'à une seule cause principale le développement d'électricité atmosphérique.

De l'électrisation des nuages.

2102. M. Gay-Lussac a trouvé une explication très ingénieuse de l'électrisation des nuages. Les globules vésiculaires qui les forment donnent à la masse d'air enveloppée la propriété de conduire l'électricité. Un nuage étant ainsi considéré comme un conducteur, on comprend que toute l'électricité répandue dans la masse d'air qu'il embrasse se porte peu à peu à sa surface, et que des nuages ainsi électrisés à la manière des conducteurs isolés de nos machines, puissent donner lieu à une explosion, lorsque, étant chargés d'électricités contraires, ou inégalement chargés de la même espèce d'électricité, ils viennent à s'approcher ou à se rencontrer.

De la formation des nuages électrisés, les uns positivement, les autres négativement.

On doit chercher à expliquer comment il se fait que les nuages soient électrisés, les uns positivement, les autres négativement, quoique l'atmosphère où ils se sont formés ne contienne que de l'électricité positive. Les corps situés à la surface de la terre doivent être électrisés négativement par l'influence de l'électricité atmosphérique positive. Il ressort de là que les brouillards qui se forment à la surface des fleuves, des lacs et de la mer, doivent être électrisés comme des corps conducteurs en contact avec le sol; et si l'échauffement des rayons solaires vient à déterminer l'ascension de ces brouillards, il doit en résulter des nuages électrisés négativement; et comme les nuages, qui existent depuis longtemps dans l'atmosphère possèdent l'électricité positive, on comprend facilement comment des nuages doués d'électricités contraires peuvent se rencontrer.

§ III. *De la foudre et de ses effets.*

2103. Il résulte évidemment des faits que nous avons

rapportés dans ce chapitre qu'il existe une similitude parfaite entre les actions électriques et les phénomènes météorologiques remarquables qui sont communément désignés sous les noms de foudre, de tonnerre, d'éclairs, etc. ; il nous reste à nous en occuper plus spécialement.

Définition de la foudre.

M. Arago définit ainsi la foudre : c'est un phénomène ou un météore qui se manifeste quand le ciel est couvert de certains nuages, d'abord par un jet subit de lumière, et quelque temps après par un bruit plus ou moins prolongé.

Des caractères extérieurs des nuages orageux.

2104. Lorsque, par un temps calme, on voit s'élever assez rapidement de quelque point de l'horizon des nuages très denses, semblables à des masses de coton amoncelées, c'est-à-dire terminés par un grand nombre de contours curvilignes brusquement et nettement arrêtés comme le sont les sommités des montagnes domiques couvertes de neige ; lorsque ces nuages se gonflent, en quelque sorte ; lorsqu'ils diminuent de nombre et augmentent de grandeur ; lorsque, malgré tous ces changements de forme, ils restent invariablement attachés à leur première base ; lorsque ces contours, d'abord si nombreux et si distincts, se fondent peu à peu les uns dans les autres, de manière à ne plus laisser bientôt à l'ensemble que l'aspect d'un nuage unique, on peut, suivant Beccaria, annoncer avec certitude qu'un orage s'approche.

D'après Franklin, deux conditions sont nécessaires pour qu'un nuage soit orageux. Il faut que ce nuage soit très étendu, il faut de plus que de petits nuages s'interposent entre sa surface inférieure et la terre. M. Hossard a de plus remarqué qu'il se produit tout-à-coup sur plusieurs points de ces nuages inférieurs des soulèvements qui se prolongent comme de longues fusées verticales, et à l'aide desquels des régions atmosphériques assez distantes peuvent se trouver en communication immédiate.

De la hauteur des nuages orageux.

2105. On a remarqué dans les Alpes, dans les Pyrénées et dans les montagnes d'Auvergne de véritables et fréquents orages à d'immenses hauteurs au-dessus de l'Océan, plus de 3,000 mètres de hauteur verticale au-dessus de la mer. Les hauteurs sont-elles jamais aussi grandes pour les orages qui éclatent sur les pays de plaine ? Pour résoudre cette question, on a recours à une méthode qui se fonde sur la comparaison

du temps de l'apparition de l'éclair et de celui de l'arrivée du bruit du tonnerre au lieu qu'occupe l'observateur. Peu de faits authentiques permettent de résoudre complétement cette question ; on peut dire d'une manière générale que la hauteur ordinaire des orages est de 500 à 600 mètres au-dessus du sol.

2106. L'éclair qu'on observe dans les orages est dû à la réunion des deux électricités contraires accumulées, soit sur les parties voisines de deux nuages différents, soit sur un nuage et un point élevé du sol. De l'éclair. Des différentes espèces d'éclair.

Les phénomènes de lumière qui se manifestent dans les orages (les *éclairs*), ont des formes assez dissemblables et des propriétés assez variées pour qu'il ait paru nécessaire à M. Arago d'en faire plusieurs classes.

La première classe comprend certains éclairs que tout le monde a dû remarquer, et qui paraissent consister en *un trait, en un sillon de lumière très resserré, très mince, très arrêté sur ses bords.*

Ces éclairs ne sont ni toujours blancs ni toujours de la même couleur. Les météorologistes déclarent en avoir vu de purpurins, de violacés, de bleuâtres.

Malgré leur incroyable vitesse, ils ne se propagent pas en ligne droite. Ordinairement, au contraire, *ils serpentent, ils dessinent dans l'espace les zigzags les plus prononcés.*

Venons maintenant aux *éclairs de la seconde classe.*

La lumière de ces éclairs, au lieu d'être concentrée dans des traits sinueux presque sans largeur apparente, embrasse, au contraire, d'immenses surfaces. Elle n'a, d'ailleurs, ni la blancheur, ni la vivacité de la lumière des éclairs fulminants. Souvent sa teinte est un *rouge très intense*. Le *bleu* ou le *violet* y dominent aussi de temps en temps.

Quand il arrive qu'un éclair de la *seconde* classe est sillonné par un éclair en *zigzag* de la première, la différence de leurs couleurs devient manifeste aux yeux les moins exercés.

Les éclairs de *la seconde classe* ne paraissent quelquefois illuminer que les contours des nuages d'où ils émanent; quelquefois aussi leur vive lumière embrasse toute l'étendue superficielle de ces mêmes nuages, et, de plus, elle semble sortir de leur intérieur. On dirait alors, en vérité, que les *nuages s'entr'ouvrent.*

Ces *éclairs de la seconde classe* sont de beaucoup les plus communs. Un grand nombre de personnes n'ont jamais vu, ou, du moins, n'ont jamais remarqué que ceux-là. Pendant un orage ordinaire il en surgit des milliers contre un éclair resserré et sinueux de la première classe.

Les *éclairs de la troisième classe* diffèrent de ceux des deux premières, par la durée, par la vitesse et aussi par la forme. Tout le monde a remarqué que l'*éclair linéaire* en zigzags nettement dessinés, que l'éclair superficiel à contours mal définis, ne durent qu'un instant à peine appréciable. Les éclairs de *la troisième classe*, au contraire, sont visibles pendant une, deux, dix, etc., secondes de temps. Ils se transportent des nuages à la terre avec assez de lenteur pour que l'œil les suive nettement dans leur marche et apprécie leur vitesse. Les espaces qu'ils embrassent sont *circonscrits, nets, définis*, et d'une forme qui doit peu différer de celle de la sphère, car, de loin, en projection, ces espaces semblent des cercles de lumière.

Ces globes lumineux apparaissent rarement dans les orages.

Du tonnerre. 2107. A l'apparition des éclairs succède le plus souvent, après des intervalles de temps plus ou moins longs, des bruits que tout le monde a entendus, mais sans remarquer peut-être les caractères divers qui les distinguent, suivant les circonstances. Lucrèce donnait une idée fort exacte de certains éclats de la foudre quand il les comparait à l'aigre cri du papier qui se déchire; quelquefois le bruit du tonnerre paraît clair et sec comme celui d'un coup de pistolet, plus généralement il est plein et grave.

Pourquoi l'éclair est-il suivi d'un roulement? Parce que ses diverses parties sont, en général, à des distances inégales de l'observateur. Quelle est la durée du roulement? Cette durée est le temps dont le son a besoin pour parcourir un intervalle égal à la différence de longueur des deux lignes menées aux deux extrémités de l'éclair. En multipliant par 337 le nombre de secondes que le roulement du tonnerre a duré, on aura donc, en mètres, la différence des deux rayons visuels menés aux deux extrémités de l'éclair; tout comme s'il avait été possible de mesurer cette différence dans l'espace. Le résultat de la multiplication sera *la limite en moins* que nous cherchions.

2108. La foudre, dans sa marche si rapide, obéit à des actions dépendantes des corps terrestres près desquels elle éclate. On a remarqué, en effet, que plusieurs fois elle avait suivi une marche précisément la même, et qu'elle avait frappé de la même manière tous les objets qu'elle avait précédemment atteints. On peut poser en règle générale que la foudre suit toujours les meilleurs conducteurs.

Marche de la foudre.

2109. Il résulte de faits nombreux que ce n'est pas seulement dans l'atmosphère que se manifestent les phénomènes des orages; on a souvent observé que lorsque l'atmosphère est orageuse, il y a simultanément dans les entrailles de la terre, à la surface ou au sein des eaux, de très remarquables perturbations. Cet état exceptionnel dans lequel les orages atmosphériques placent la partie solide du globe, se manifeste quelquefois par des détonations foudroyantes qui, sans aucune apparence lumineuse, produisent cependant les mêmes effets que la foudre. On a remarqué d'autres fois de larges phénomènes lumineux dont la terre est d'abord le siége, et qui disparaissent à la suite d'une explosion, soit dans le lieu même où ils sont nés, soit après un déplacement plus ou moins étendu et plus ou moins rapide. Outre ces larges et détonants phénomènes, et qui apparaissent quelquefois à la surface du globe, on aperçoit souvent, pendant un temps orageux, de vives lumières et légèrement sifflantes aux parties les plus saillantes des corps terrestres. Les anciens, qui notaient avec le plus grand soin ces phénomènes, désignaient ces feux sous les noms de *Castor* et *Pollux*; aujourd'hui ils sont plus généralement connus sous les noms de *feux Saint-Elme*.

Action par influence d'un orage sur la terre.

Feux St-Elme.

2110. M. Arago pense qu'il est permis d'affirmer, d'après l'ensemble des documents qu'il a recueillis, qu'en pleine mer ou dans les îles il ne tonne jamais au-delà de 75 degrés de latitude nord; que l'atmosphère océanique est beaucoup moins apte à engendrer les orages que celle des continents; que c'est dans le haut Pérou que les orages sont les plus communs; que les orages étaient plus fréquents autrefois qu'ils le sont aujourd'hui.

De la fréquence des orages dans différents lieux.

2111. On cite des coups de tonnerre qui n'ont été précédés d'aucun éclair. M. Arago donne une explication satisfaisante de ce phénomène en remarquant que l'étincelle peut avoir

Tonnerre sans éclairs. Éclairs sans tonnerre.

lieu entre deux nuages élevés assez denses pour s'opposer à la transmission des ondes lumineuses sans arrêter les ondes sonores.

On a plus souvent remarqué des éclairs par un ciel parfaitement serein; ils sont connus sous le nom d'éclairs de chaleur; ils s'expliquent par la réfraction atmosphérique d'un orage trop éloigné pour que ses nuages soient aperçus et que son tonnerre soit entendu.

Des effets de la foudre.

2112. Les effets de la foudre ne diffèrent pas de ceux dus au passage instantané de l'électricité à travers les corps, mais produits avec une grande intensité.

La foudre développe par son action, dans les lieux où elle éclate, souvent de la fumée, presque toujours une odeur forte qu'on a souvent comparée à celle du soufre qui brûle. Sous l'influence de l'orage, l'oxigène et l'azote de l'air peuvent se combiner pour produire de l'acide nitrique. Liebig analysa 77 résidus obtenus par la distillation de 77 échantillons d'eau de pluie, recueillis dans des vases de porcelaine à 77 époques différentes. Parmi ces 77 échantillons d'eau, 17 provenaient de pluies d'orage. Eh bien, ces 17 pluies d'orage contenaient toutes de l'*acide nitrique* en plus ou moins grande quantité, combiné à de la chaux ou à de l'ammoniaque. Dans les autres échantillons, au nombre de 60, M. Liebig n'en trouva que 2 où il existât des traces d'acide nitrique.

Phénomènes physiques produits par la foudre.

2113. La foudre produit des phénomènes physiques souvent très remarquables; elle a souvent opéré la fusion des pièces métalliques qu'elle a frappées; elle a souvent raccourci les fils métalliques à travers lesquels elle a passé, lorsque sa puissance n'était pas assez grande pour en déterminer la fusion. C'est non seulement sur les substances métalliques que cette action s'exerce, mais la foudre peut encore mettre en fusion certaines substances terreuses et les vitrifier instantanément. On trouve dans plusieurs localités, au milieu des sables, des tubes creux qui descendent souvent selon la verticale, et dont la longueur totale dépasse souvent 10 mètres. Ces tubes, connus sous le nom de tubes de foudre ou de fulgurites, avaient été découverts il y a près de 100 ans par le pasteur Hermann, à Massel, en Silésie. La paroi intérieure du tube de foudre est un verre parfait, uni et brillant, sem-

Fulgurites.

blable à de l'opale ; elle raye le verre et fait feu au briquet ; ils sont environnés à leur partie extérieure de grains de quartz agglutinés.

Ces tubes sont produits sous l'influence de la foudre. Hagen de Konisberg en observa un immédiatement après sa formation et lorsqu'il était encore chaud. Ainsi, il ne peut rester de doutes à cette origine des fulgurites.

La foudre produit encore des phénomènes mécaniques très remarquables. On a noté qu'elle pouvait percer de plusieurs trous les corps qu'elle avait frappés. Mais ce qui est surtout digne d'attention, ce sont les phénomènes de transports qu'on a signalés. On a vu ce météore transporter quelquefois au loin des masses d'un grand poids et fortement scellées.

La foudre parcourt toujours la route non la plus courte, mais celle formée par des corps meilleurs conducteurs de l'électricité ; elle sillonne l'atmosphère en lignes brisées pour suivre les parties de l'air plus chargées d'humidité ; elle préfère les conducteurs métalliques aux corps des animaux, mais aussi ces derniers aux végétaux. M. Arago explique la plupart des effets mécaniques de ruptures et de transports produits par la foudre, en admettant la réduction instantanée en vapeur de l'eau disséminée dans les corps traversés.

Un des effets les plus remarquables de la foudre, c'est de se porter de préférence sur les métaux, lorsqu'il en existe, à découvert ou cachés, soit dans le voisinage des lieux vers lesquels elle tombe directement, soit près de ceux où sa course serpentante l'amène ensuite. Cet effet se comprend bien d'après la propriété conductrice de ces corps. La foudre ne produit de dégâts notables qu'à son entrée dans les masses métalliques, ou au moment de sa sortie.

Une autre propriété des plus curieuses de la foudre, sur laquelle nous avons déjà appelé l'attention, est la suivante : quand elle passe près d'une aiguille de boussole, elle en altère le magnétisme, le détruit entièrement ou renverse les pôles. Dans les mêmes circonstances, elle peut communiquer une aimantation plus ou moins forte à des barres de fer ou d'acier, qui, auparavant, n'en offraient aucune trace.

§ IV. *Des dangers que fait courir la foudre et des moyens proposés pour s'en garantir.*

2114. Dans l'intérieur des grandes villes d'Europe, les personnes paraissent très peu exposées à être frappées par la foudre ; mais on a souvent noté dans les campagnes de nombreuses morts causées par le tonnerre, et de beaucoup plus nombreux incendies déterminés par ce météore.

La foudre fait périr les animaux, soit en lésant les organes et le système vasculaire, soit en paralysant le système nerveux ; la putréfaction s'en opère très promptement, mais de la même manière que celle de tous les animaux frappés d'une mort subite quelconque. L'acescence du lait et la corruption des chairs, plus promptes par des temps d'orage que par des temps ordinaires, paraissent dues, d'une part, à la température élevée qui règne alors, et de l'autre aux courants de matière électrique auxquels ces corps sont exposés, et qu'on sait être un agent puissant de décomposition.

Le bruit que la foudre fait entendre cause ordinairement beaucoup d'effroi, et cependant tout danger est déjà passé : il n'en existe même plus pour une personne qui a vu l'éclair ; car, si elle devait être foudroyée, elle ne verrait ni n'entendrait le coup qui serait prêt à la frapper. Le bruit ne vient jamais qu'après l'éclair, et il s'écoule autant de secondes entre l'apparition de l'éclair et le bruit qui le suit, qu'il y a de fois 337 mètres entre le lieu où l'on est et celui où la foudre a éclaté.

La foudre tombe souvent sur les arbres isolés, parce que ceux-ci s'élevant à une grande hauteur, et enfonçant profondément leurs racines dans le sol, sont de véritables paratonnerres ; aussi leur abri est souvent fatal aux personnes qui le recherchent. Ils n'offrent pas, en effet, à la foudre un écoulement assez prompt dans le sol, et ils sont plus mauvais conducteurs que l'homme et les animaux ; la foudre les abandonne pour suivre la voie qui est meilleure conductrice.

Choc en retour. 2115. Il est un phénomène remarquable produit par la foudre et connu sous le nom de *choc en retour*, sur lequel nous devons nous arrêter spécialement. Ce phénomène consiste en ce que les animaux peuvent éprouver de violentes commo-

tions, et même quelquefois périr à l'instant où la foudre éclate à un point qui peut être très éloigné. Voici l'explication de ce fait extraordinaire. Quand un nuage électrisé passe au-dessus de la surface du sol, il agit par influence sur l'électricité naturelle de tous les corps situés à la surface de la terre, attire l'électricité contraire à la sienne vers les extrémités supérieures de tous ces corps, et repousse l'autre fluide dans le réservoir commun. Ainsi, tous les corps qui couvrent une étendue de pays proportionnelle à celle du nuage, et qui peuvent être très éloignés les uns des autres, sont tous chargés d'électricité latente, de nom contraire à l'électricité libre du nuage. Si l'explosion a lieu sur l'un d'eux, soit à cause de sa plus grande élévation, soit parce que le nuage descend plus près de lui, soit à cause de sa plus grande conductibilité, l'électricité du nuage ayant disparu par cette décharge, l'électricité latente répandue sur les autres corps devenant libre et rentrant librement dans le réservoir commun, ou attirant rapidement l'électricité de nom contraire nécessaire pour la neutraliser, il peut en résulter, sur les corps animés que traversent rapidement ces masses de fluide, des commotions souvent très violentes et même la mort.

On peut démontrer expérimentalement la réalité de cette explication ; pour cela il suffit de placer à une certaine distance d'une machine électrique un conducteur garni d'un électromètre ; ce dernier s'électrise par influence, ce que l'on reconnait à la déviation du pendule, et la recomposition des fluides, qui a lieu toutes les fois qu'on décharge la machine, produit dans le pendule un mouvement très sensible. En remplaçant l'électroscope par une grenouille écorchée, elle éprouve de vives agitations quand on tire une étincelle de la machine. Le choc en retour ne produit jamais les effets de transport et de chaleur qui accompagnent toujours la chute de la foudre sur les corps qu'elle frappe directement; c'est un moyen facile de distinguer les premiers effets des seconds.

Des moyens de se garantir de la foudre.

2116. Les anciens pensaient que la foudre ne pénétrait jamais dans la terre au-delà de 2 mètres. Aussi, la plupart des cavernes leur semblaient-elles un abri assuré ; l'existence des tubes vitreux, qui descendent quelquefois à plus de 10 mètres, montre l'erreur des anciens à cet égard. L'opinion que certains arbres ne sont jamais frappés de la foudre ré-

gnait dans l'antiquité et est encore répandue aujourd'hui; mais les faits attentivement examinés ont montré qu'elle n'avait rien de fondé; les arbres résineux eux-mêmes ne sont pas plus épargnés que le laurier, qui passait pour n'en être jamais atteint. On a prétendu que l'effet des grands feux allumés en plein air était le meilleur moyen de prévenir les orages ou de les rendre moins redoutables. Cette opinion, malgré l'autorité de Volta, est loin d'être généralement admise. Il en est de même du bruit du canon considéré comme moyen propre à dissiper les orages.

Dans les campagnes on sonne les cloches aux approches d'un orage, pour l'écarter et fendre, dit-on, la nuée orageuse; on cherche aussi un abri contre la foudre dans les églises et dans les clochers. Mais cette habitude, comme le prouve l'expérience, a souvent des suites les plus funestes. Il est certain, en effet, que le tonnerre tombe fréquemment aussi bien sur les clochers où l'on sonne, que sur ceux où l'on ne sonne pas; et, dans le premier cas, les sonneurs sont en danger d'être foudroyés, à cause des cordes qu'ils tiennent dans leurs mains et qui peuvent conduire la foudre jusqu'à eux. Les églises n'offrent pas un abri beaucoup plus sûr que les clochers, soit parce que ceux-ci, après avoir attiré la foudre sur eux en raison de leur élévation, sans pouvoir toujours la conduire dans le sol, laissent les églises exposées à son action; soit parce que des individus rassemblés forment un grand conducteur sur lequel la foudre se jette de préférence aux objets environnants. La prudence commande donc, tant que les clochers et les églises ne seront pas armés de paratonnerres, de ne point s'y rassembler pendant un orage; et pour ne citer qu'un exemple, nous rapporterons que lorsque la foudre tomba sur l'église de Châteauneuf-les-Moutiers, arrondissement de Digne, département des Basses-Alpes, le 11 juillet 1819, pendant le service divin, elle y tua roide neuf personnes et en blessa plus ou moins quatre-vingt-deux.

Après avoir rapidement passé en revue les principaux moyens à l'aide desquels on a successivement espéré se garantir des dangers de la foudre, il nous reste à parler du seul moyen vraiment efficace, des paratonnerres modernes.

Description du paratonnerre.

2117. L'invention des paratonnerres est une grande découverte d'application due au génie de Franklin. Nous allons

en donner la description d'après une instruction rédigée par M. Gay-Lussac au nom de la section de physique de l'Académie des sciences. Un paratonnerre est une barre métallique s'élevant au-dessus d'un édifice, et descendant, sans aucune solution de continuité, jusque dans l'eau d'un puits ou dans un sol humide. On donne le nom de tige à la partie verticale qui se projette dans l'air au-dessus du toit, et celui de conducteur à la portion de la barre qui descend depuis le pied de la tige jusque dans le sol.

La tige est une barre de fer carrée, amincie de sa base à son sommet, en forme de pyramide. Pour une hauteur de 7 à 9 mètres, qui est la hauteur moyenne des tiges qu'on place sur les grands édifices, on lui donne à sa base de 54 à 60 millimètres de côté.

Le fer étant très exposé à se rouiller par l'action de l'eau et de l'air, la pointe de la tige serait bientôt émoussée; pour obvier à cet inconvénient, on retranche de l'extrémité de la tige une longueur d'environ 55 centimètres, et on la remplace par une tige conique de cuivre jaune, dorée à son extrémité, ou terminée par une petite aiguille de platine de 5 centimètres.

Conducteur du paratonnerre.

Le conducteur du paratonnerre est une barre de fer partant du pied de la tige et se rendant dans le sol. On donne à cette barre de 15 à 20 millimètres en carré. Le conducteur ne pouvant être d'une seul pièce, on réunit plusieurs barres bout à bout pour la former.

Le conducteur, après s'être replié sur la corniche du bâtiment sans la toucher, s'applique contre le mur le long duquel il doit descendre dans le sol, et se fixe au moyen de crampons que l'on fiche ou que l'on scelle dans la pierre.

Le fer enfoncé dans le sol, en contact immédiat avec la terre et l'humidité, se couvre d'une rouille qui gagne peu à peu son centre et finit par le détruire. On évite cette altération en faisant courir le conducteur dans un auget rempli de charbon.

Le conducteur, sortant de l'auget dont on vient de parler, perce le mur du puits dans lequel il doit descendre, et s'immerge dans l'eau de manière à y rester plongé de 65 centimètres au moins dans les eaux les plus basses. Si le puits est placé dans l'intérieur du bâtiment, on percera le mur de

ce dernier au-dessous du sol; et on dirigera par l'ouverture qu'on aura faite le conducteur dans le puits.

Disposition générale des paratonnerres sur un édifice.

On admet, d'après l'expérience, qu'une tige de paratonnerre protège efficacement contre la foudre autour d'elle un espace circulaire d'un rayon double de sa hauteur. Ainsi, d'après cette règle, un bâtiment de 20 mètres en long ou en carré n'aurait besoin, pour être défendu, que d'une seule tige de 5 à 6 mètres de hauteur, élevée sur le milieu de son toit.

Observations sur l'efficacité des paratonnerres.

Une expérience de soixante-quinze années sur l'efficacité des paratonnerres démontre que, lorsqu'ils ont été construits avec les soins convenables, ils garantissent de la foudre les édifices sur lesquels ils sont placés. Dans les États-Unis d'Amérique, où les orages sont beaucoup plus fréquents et plus redoutables qu'en Europe, leur usage est devenu populaire; un très grand nombre de bâtiments ont été foudroyés, et l'on en cite à peine deux qu'ils n'aient pas mis entièrement à l'abri des atteintes de la foudre. La crainte d'une chute plus fréquente de la foudre sur les édifices armés de paratonnerres n'est pas fondée, car leur influence s'étend à une trop petite distance pour qu'on puisse croire qu'ils déterminent la foudre d'un nuage à se précipiter dans le lieu où ils sont établis. Il paraît, au contraire, certain, d'après l'observation, que les édifices armés de paratonnerres ne sont pas foudroyés plus souvent qu'avant qu'ils ne le fussent. D'ailleurs, la propriété d'un paratonnerre d'attirer plus fréquemment la foudre supposerait aussi celle de la transmettre librement dans le sol, et dès lors il ne pourrait en résulter aucun inconvénient pour la sûreté.

On recommande l'usage des pointes aiguës pour les paratonnerres, parce qu'elles ont l'avantage, sur les barres arrondies à leur extrémité, de verser continuellement dans l'air, sous l'influence du nuage orageux, un torrent de matière électrique de nature contraire à la sienne, qui doit très probablement se porter vers celle du nuage, et en partie la neutraliser. Cet avantage n'est pas du tout à négliger; car il suffit de connaître le pouvoir des pointes et les expériences de Romas avec un cerf-volant sous un nuage orageux pour rester convaincu que les paratonnerres en pointe, s'ils étaient plus multipliés et placés sur des lieux élevés, diminueraient

réellement la matière électrique des nuages et la fréquence de la chute de la foudre sur la surface de la terre. Ce résultat paraît évident pour Paris. Les accidents causés par la foudre y sont infiniment rares depuis que les principaux édifices sont garnis de paratonnerres.

2118. Un des phénomènes les plus remarquables que l'on doit attribuer à l'électricité atmosphérique est certainement la formation de la grêle ; elle se remarque surtout dans nos climats aux heures les plus chaudes de la journée. Elle tombe rarement pendant la nuit ; elle précède et accompagne souvent les pluies d'orage. Pour établir la théorie de la formation de la grêle, il faut d'abord admettre la formation de neige ou de très petits glaçons ; formation déterminée, soit, comme le voulait Volta, par l'évaporation des gouttes de pluie produite par la chaleur solaire, soit par une basse température subitement déterminée par les vents d'est ou du nord. Mais on n'explique ainsi que la formation de très petits grêlons. Pour se rendre compte de leur accroissement souvent très considérable, Volta se rappela une ancienne expérience connue sous le nom de *danse des pantins*, dans laquelle des corps légers sont successivement attirés et repoussés par deux plateaux dont l'un communique avec le conducteur d'une machine électrique et l'autre avec le sol ; et il se rendit ainsi compte de la formation des grêlons d'un volume considérable. Lorsque ce phénomène est produit, il doit exister deux nuages, placés l'un au-dessus de l'autre, électrisés de manière différente, attirant chacun et repoussant en outre les grêlons qui, dans une série de voyages successifs entre les deux nuages, peuvent atteindre les volumes considérables que plusieurs observateurs ont notés et qu'on a vu s'élever à 750 grammes. Un fait qui pourrait corroborer l'explication ingénieuse de Volta, c'est que la chute de la grêle est ordinairement précédée par un bruit semblable à celui que produirait le choc de corps durs agités par des mouvements rapides. Quoi qu'il en soit, cette hypothèse n'est pas généralement admise. De la grêle.

2119. On donne le nom de trombe à un nuage épais d'une forme particulière et animé de divers mouvements ; sa forme est le plus souvent celle d'un cône presque toujours renversé. Des trombes.

Ce nuage lance autour de lui avec une violence considé-

rable des torrents de pluie souvent mêlée de grêle ; l'air qui l'environne est dans une inexprimable agitation, les arbres sont déracinés, les maisons renversées; il entraîne tout ce qui ne présente pas une grande résistance ; on voit des globes de feu, des étincelles électriques, une odeur de soufre a souvent été signalée dans les habitations atteintes par le météore ; enfin voici le phénomène le plus remarquable, lorsque la trombe passe au-dessus des surfaces remplies d'eau ce liquide est soulevé comme par un véritable effet d'aspiration. C'est probablement à cet effet qu'on doit attribuer les pluies de crapauds que plusieurs observateurs dignes de foi ont constatées. Une remarque importante que l'on peut faire sur la trombe marine, c'est que lorsqu'elle est traversée par un boulet de canon ordinairement elle se divise ; la partie inférieure disparaît, et la partie supérieure paraît comme suspendue aux nuages.

La trombe ne paraît être qu'une transformation particulière de l'orage, un nouveau mode de décharge de l'électricité des nuages. M. Peltier, qui a observé avec soin la marche de la trombe qui dévasta la commune de Chatenay, le 10 juin 1839, donna une théorie satisfaisante de ce phénomène ; qui, d'après la description qu'il a publiée, paraît occasionné par la présence, au même lieu, de deux orages chargés de la même espèce d'électricité, l'un supérieur, l'autre inférieur. Le premier, qui s'était à peu près formé sur place, repoussant le second qui arrivait assez rapidement du sud, les nuages placés en tête de ce dernier s'abaissèrent vers la terre, formèrent une trombe et communiquèrent avec le sol par l'intermédiaire des arbres. Cette communication établie, le tonnerre cessa de gronder, la décharge de l'orage inférieur, ainsi transformé, s'opéra successivement par les arbres de la plaine, qui furent desséchés, brisés, rompus ou déracinés. Tandis que l'orage inférieur subissait cette transformation, l'orage supérieur était resté stationnaire ; mais dès que la trombe fut parvenue au-dessous de ses limites, il commença à s'ébranler et s'éloigna vers l'ouest.

M. Peltier est parvenu à reproduire en petit les traits les plus saillants du phénomène qu'il avait si bien observé. Il employa pour cela un globe de métal chargé par une machine électrique toujours en mouvement, et qui remplaçait

le nuage abaissé de la trombe; des tiges implantées dans ce globe, et qui se terminaient, soit en pointes, soit par des boules polies, représentaient les inégalités du nuage. Le globe constamment électrisé attire les corps légers, les repousse et leur imprime des mouvements giratoires lorsqu'ils éprouvent des résistances inégales, ou lorsque leur forme est allongée ou plate. Si l'on place à peu de distance au-dessous un vase contenant un liquide échauffé, les vapeurs s'élèvent plus vite, et la vaporation est jusqu'à trois fois plus considérable.

Le disque de métal, disposé au-dessus d'une masse d'eau, exerce une action dépressive, s'il est garni de pointes; au contraire, s'il est muni de boules polies, il la soulève en boutons coniques.

Cette expérience montre que l'origine des trombes est la même que celle des orages ordinaires; mais l'électricité, au lieu de se dissiper par la pluie, par des étincelles électriques, ne quitte pas les nuages, mais les déforme, les entraîne avec elle vers la terre. Si à l'attraction du fluide latent répandu sur le sol, et qui peut n'être pas suffisante pour déterminer ce mouvement, vient s'ajouter une force répulsive énergique, comme celle d'un orage supérieur, la trombe est formée, elle attire les corps qui recouvrent la surface de la terre, les repousse ensuite et leur imprime des mouvements de translation rapides, convergents et divergents, qui se transforment parfois en mouvement de rotation, et produit ainsi tous les désastres qu'on a eu plus d'une occasion de signaler.

LIVRE DIXIÈME.

DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

DE LA PILE DE VOLTA.

§ I. *Expériences de Galvani.*

Découverte du galvanisme.

2120. Galvani, professeur de physique à Bologne, avait entrepris, dans l'année 1789, des expériences sur l'excitabilité des organes musculaires sous l'influence de l'électricité. Il employait dans ses recherches des grenouilles disséquées et préparées comme l'indique la figure 609. La colonne vertébrale étant coupée, les nerfs lombaires étant mis à nu, il passa dans la portion restante E de la colonne vertébrale, un crochet en fil de cuivre. Un jour, il suspendit plusieurs grenouilles préparées par ces crochets de cuivre au balcon de fer d'une terrasse ; à l'instant, leurs pieds et leurs jambes, qui posaient en partie sur le fer, entrèrent en convulsion spontanée ; et l'effet se répéta autant de fois que le contact fut répété. Galvani fut frappé de l'importance de ce phénomène ; il s'efforça d'en déterminer les circonstances principales ; il fixa sur ce point l'attention du monde savant, et il parvint ainsi à attacher son nom à la plus belle partie peut-être des sciences physiques, le *galvanisme*.

Fig. 609.

Observations de Galvani.

2121. Voici les principales observations de Galvani. Il reconnut que les grenouilles préparées n'éprouvaient pas de convulsions permanentes. Pour que ces convulsions apparaissent, il faut qu'on établisse une communication par un arc métallique entre les nerfs et les muscles de la grenouille. Il ob-

serva que ces convulsions pouvaient être manifestées quand l'arc était d'un seul métal, mais qu'elles étaient alors rares et faibles, et que pour les rendre fortes et durables il fallait employer deux métaux différents. Voilà vraiment le caractère essentiel de la découverte de Galvani. Il remarqua très bien qu'à chaque contact nouveau des deux métaux, les jambes de la grenouille se repliaient et s'agitaient comme dans l'état de vie. Ces effets peuvent se reproduire encore quelques heures après la mort de la grenouille, mais le plus souvent ces convulsions s'affaiblissent très promptement, et après 20 à 30 minutes on ne distingue plus que de faibles palpitations dans les fibres musculaires.

Préparation de la grenouille pour les expériences galvaniques.

2122. Voici le meilleur moyen pour préparer une grenouille pour répéter les expériences de Galvani. Prenez une grenouille, et après avoir coupé son corps transversalement au-dessous des bras, dépouillez promptement ses jambes et ses cuisses de la peau qui les recouvre; retranchez ensuite toutes les chairs et toutes les parties qui recouvrent les nerfs lombaires désignés par N N dans la fig. 610; puis coupez la colonne vertébrale de manière que les jambes et les cuisses restent suspendues uniquement par ces nerfs. Alors, enveloppez-les d'une petite feuille de cuivre ou de zinc; posez la grenouille ainsi préparée sur un support isolant, par exemple sur une plaque de verre vernie à la gomme laque, et, prenant un morceau de tout autre métal recourbé en forme d'arc, posez une des extrémités sur l'armature des nerfs et l'autre extrémité sur les muscles des cuisses; aussitôt vous verrez les convulsions se manifester, non seulement dans la cuisse et la jambe que vous aurez touchées, mais encore dans l'autre. **Fig. 610.**

Hypothèse de l'électricité animale.

2123. Galvani avait récemment reconnu que l'électricité développée au moyen d'une machine électrique produisait sur les grenouilles préparées des effets tout-à-fait semblables à ceux qu'il avait observés; il était en droit de conclure que les convulsions produites par le contact des métaux hétérogènes était l'effet de quelque courant électrique que ce contact développait. Mais les grandes découvertes ne peuvent être achevées par un seul homme : les sciences d'observation et d'expérience sont l'œuvre du temps et l'œuvre de tous. Galvani ne saisit point nettement le lien qui unissait

les divers phénomènes qu'il avait observés; il crut apercevoir l'effet extraordinaire d'une nouvelle source d'électricité qu'il désigna sous le nom d'*électricité animale*, qui, existant primitivement dans les muscles ou dans les nerfs, circulait quand on mettait ces parties en communication par un arc métallique, ou par d'autres corps bons conducteurs de l'électricité. Galvani essaya, mais vaguement, d'assimiler cette action à celle de la bouteille de Leyde.

Quoi qu'il en soit de sa théorie, la découverte de Galvani excita au dernier point l'attention de tous les physiciens de l'Europe. On s'empressa à l'envi de répéter ses observations. Un grand nombre de savants adoptèrent ses idées théoriques, et parmi ceux-ci on doit surtout distinguer les membres de la commission nommée par l'Institut de France. Cette commission admit une distinction entre le fluide électrique et le fluide galvanique, et crut voir dans l'organisation animale un principe dans lequel réside l'essence des rapports mutuels du système nerveux et du système musculaire. Mais pour admettre ces explications, il fallait se jeter dans des questions compliquées sur les fonctions vitales et les mystères de l'organisation. Cette théorie obscure rencontra plusieurs contradicteurs, parmi eux on doit surtout distinguer Volta, professeur de physique à Pavie, déjà célèbre dans la science par la découverte du condensateur, de l'électrophore et de l'eudiomètre.

§ II. *Expériences de Volta.*

2124. Volta prit à tâche de démontrer qu'il n'existait pas d'électricité particulière aux animaux, et que ceux-ci ne servaient que de conducteurs en raison des liquides dont leurs parties étaient imprégnées. Voici le passage le plus remarquable de ses premières dissertations, et voici comment Volta expose ses premières idées sur la théorie du contact :

De l'électricité développée par contact.

« On n'a pas encore établi si dans les expériences galvaniques » les contractions très fortes excitées dans les muscles et les » mouvements des membres, à cause du double contact, » d'abord sur le muscle, ensuite sur le nerf de l'animal bien » préparé et disséqué avec soin, mouvement que personne » ne doute devoir être attribué au fluide électrique, qui se

» porte d'une partie à l'autre au moyen de l'arc conducteur ; » si, dis-je, les contractions ont lieu parce que ce fluide se » dirige de lui-même ou par la seule force des organes de » l'animal sur telle ou telle partie, et qu'on pourrait alors » appeler une électricité véritable et propre à l'animal, ainsi » que le prétend Galvani ; ou si cela arrive quelquefois, » comme je l'ai vu dans plusieurs cas, parce que les métaux » employés dans les expériences étant immédiatement appli- » qués sur les parties des animaux pleins de sucs, peuvent, » par eux-mêmes et par leur propre vertu, remuer, exciter, » chasser le fluide électrique qui était en repos, en sorte » qu'alors les organes de l'animal n'agissent que passive- » ment. Il n'y a pas long-temps, à la vérité, que par des » expériences indubitables j'ai montré que les métaux, et » même les meilleurs charbons de bois, étaient non seule- » ment les plus parfaits conducteurs de l'électricité, mais » même des excitants par le moyen du simple contact... C'est » moi qui ai fait la découverte qu'avec les mêmes corps on » peut troubler l'équilibre de la matière électrique et créer » une nouvelle électricité. C'est réellement par eux-mêmes » et par leur propre vertu, en tant qu'ils poussent et qu'ils » forcent le fluide électrique à entrer dans la superficie » qu'ils touchent, ou à en sortir, que les métaux et les char- » bons excitent cette faible électricité, qui est assez puissante » pour convulsionner les fibres nerveuses qu'elle rencontre » et les muscles sans aucune friction ou autres moyens, » pourvu que les métaux soient convenablement appliqués à » l'eau ou à des corps imbus d'humeur aqueuse, tels que » les nerfs et les muscles des animaux, soit vivants, soit ré- » cemment tués. »

Voilà comment Volta préluda aux admirables découvertes que nous exposerons. Bientôt une lutte s'établit entre Galvani et Volta : plus le premier accumulait de faits pour défendre sa théorie, plus le second cherchait à la renverser en apportant de nouvelles preuves à l'appui de son opinion. On crut un instant Galvani vainqueur quand il prouva, aidé de son neveu Aldini, que l'arc métallique n'était pas nécessaire pour exciter les contractions, puisqu'on les observait encore dans une grenouille nouvellement écorchée, en mettant en contact les muscles cruraux avec les nerfs lombaires. Mais

Volta répondit sur-le-champ que ce fait n'était qu'une généralisation de son principe, d'après lequel tous les corps suffisamment bons conducteurs se constituaient toujours par leur contact mutuel dans deux états électriques contraires.

Une observation remarquable démontrait bien l'influence de l'hétérogénéité du conducteur métallique sur l'intensité des commotions produites. Un arc fait avec un seul métal peut suffire pour exciter des commotions; mais si on en frotte l'extrémité sur un autre métal, il agit avec beaucoup plus d'énergie; les parcelles imperceptibles qui s'y rattachent lui communiquent une hétérogénéité suffisante, et c'est au contact du métal et de ces parcelles étrangères que l'électricité se développe.

Preuves du développement de l'électricité par le contact.

2125. Les observations de Volta étaient bien concluantes, mais l'idée du développement de l'électricité au contact des corps hétérogènes n'était point encore généralement admise, le monde savant avait besoin d'expériences plus directes. Volta ne les fit pas long-temps attendre; il employa à cet effet un instrument qu'il avait inventé, le *condensateur*, et que nous avons décrit (2072). Après s'être assuré que le condensateur gardait bien le fluide électrique qu'il lui communiqua, et après l'avoir remis à l'état naturel, il établit avec les doigts mouillés une communication entre son plateau supérieur et le sol, en même temps il mit en contact avec le plateau inférieur une plaque de zinc communiquant avec le sol; il enleva alors le disque supérieur, et il observa une divergence sensible dans les lames d'or. Quelle est la source de l'électricité développée? Il est clair que la seule cause qui a pu la développer, c'est le contact de la lame de zinc avec la lame de cuivre du plateau. Si on substitue à la lame de zinc une lame de même métal que le plateau, comme on devait s'y attendre, nul effet n'est produit; mais si on emploie des métaux différents, on observe toujours la divergence des lames, et par conséquent il y a toujours développement d'électricité. Le zinc, le fer, l'étain, le plomb, le bismuth et l'antimoine prennent l'électricité vitrée et communiquent au plateau de cuivre une charge résineuse; tandis que l'or, l'argent, le platine, produisent un effet inverse: ils prennent de l'électricité résineuse et donnent au cuivre l'électricité vitrée.

Ces expériences sont très importantes et on peut déjà les

regarder comme décisives; cependant, on pourrait objecter que l'électricité qui se développe dans cette circonstance peut tenir à la compression exercée par les lames métalliques sur le plateau de cuivre. Mais Volta parvint à lever toute incertitude et à prouver péremptoirement que l'action développée au contact des métaux est excitée par une influence réciproque qui décompose leurs fluides électriques. Voici par quelle expérience décisive il parvint à établir ce fait capital. Il forma une lame métallique avec deux morceaux C_1, Z_1 (fig. 611), l'une de zinc, l'autre de cuivre, soudés bout à bout; puis, prenant entre les doigts l'extrémité de la lame qui est de zinc, il toucha avec l'autre extrémité qui est de cuivre, le plateau supérieur d'un condensateur C qui est aussi de cuivre et dont le plateau inférieur communique avec le sol. Après le contact il enleva le plateau touché et le trouva électrisé résineusement. Pour que l'électricité, ainsi produite par un seul contact, soit très marquée, il faut que le condensateur soit beaucoup plus large que celui de l'électroscope, et que sa force condensante soit considérable. Fig. 611.

1126. Volta donna le nom de *force électro-motrice* à cette force nouvelle qui naît au contact des substances hétérogènes; elle réside à la surface de jonction, et là elle agit pour séparer l'électricité naturelle des deux corps hétérogènes; elle sépare sans cesse les deux fluides, elle fait passer le fluide positif sur l'un des corps et le fluide négatif sur l'autre. Voici les caractères principaux de cette force: 1° elle produit, comme nous venons de le dire, la décomposition des fluides naturels; 2° elle empêche leur recomposition. D'après le premier caractère, le fluide positif est poussé sur un métal et le fluide négatif sur un autre. D'après le deuxième caractère, les fluides contraires sont maintenus en présence, l'un à droite, l'autre à gauche de la surface de contact, sans pouvoir franchir cette surface et se recombiner en vertu de leur attraction réciproque. Cet obstacle à la recomposition de la force électro-motrice a une limite; on appelle tension maximum le plus grand effort que cette force puisse opposer à la recomposition des deux fluides qui peut s'effectuer quand la tension est trop considérable; mais, encore dans ce cas, la force électro-motrice retient tout ce qu'elle peut arrêter. Force électro-motrice.

Électro-moteurs. La force électro-motrice est une force permanente; elle est toujours prête à entrer en action dès que la tension n'est pas ce qu'elle doit être pour l'équilibre galvanique. Cette force est instantanée, parce qu'il ne lui faut qu'un temps inappréciable pour porter cette tension à son maximum. Tous les corps ne développent pas et ne peuvent retenir par le contact les mêmes tensions électriques; les métaux viennent au premier rang sous ce rapport. On les appelle tous électro-moteurs; mais alors ils présentent encore entre eux des différences très marquées. Les autres substances ne donnent par leur contact que des signes d'électricité à peine sensibles avec le condensateur ordinaire. Volta les appelait corps non-électro-moteurs; mais on est parvenu depuis, au moyen d'appareils beaucoup plus sensibles que nous ferons connaître bientôt, à prouver que ces substances développent aussi de l'électricité par leur contact. Ainsi, cette force que Volta a découverte, est une force de la nature partout et continuellement agissante. Nous allons maintenant nous occuper de l'admirable appareil auquel il a donné son nom.

§ III. *Origine de la pile de Volta.*

2127. La lutte continuait entre les partisans de Galvani et ceux qui, à l'exemple de Volta, attribuaient les contractions de la grenouille à l'électricité dégagée par le contact, lorsque, le 20 mars 1800, Volta annonça à la Société royale de Londres une de ces grandes découvertes qui lèvent tous les doutes et qui impriment une direction nouvelle aux sciences. Cette découverte était celle de la pile. Volta, qui s'était précédemment efforcé à prouver que le galvanisme n'était qu'une application nouvelle de l'électricité, chercha les moyens d'en augmenter les effets au point de rendre leur véritable nature évidente à tous les yeux. Voici le principe qui lui servit de guide. D'après Volta la force électro-motrice d'un système de deux plaques en contact de métaux différents, de zinc et d'argent par exemple, n'est pas diminuée si l'on charge ce système, comme tout autre conducteur, d'électricité positive ou négative; soit, par exemple, un système isolé contenant, + 1 d'électricité positive sur la partie zinc, — 1 d'électricité négative sur la partie argent, si on lui communique

Principe de Volta.

d'une source quelconque une quantité $2n$ d'électricité positive, il contient alors une quantité $n+1$ d'électricité sur la partie zinc, et $n-1$ sur la partie argent; en sorte que la différence 2 de l'état électrique des deux parties est constante et sert de mesure à la force électro-motrice.

2128. Le principe de Volta étant admis, on en déduit comme conséquence que l'équilibre électrique ne peut exister entre deux plaques d'argent et de zinc en contact, que si la différence entre leurs états électriques est égale à la force électro-motrice, tandis que si ces plaques sont séparées par un conducteur humide non-électro-moteur, leurs états électriques doivent être égaux. Si l'on place, par exemple, au-dessus d'un couple de plaques d'argent et de zinc (A_1, Z_1) un disque de drap humide, puis au-dessus un autre couple des mêmes métaux (A_2, Z_2) l'équilibre électrique n'existe dans ce système que lorsque la différence entre les états électriques du premier disque d'argent A_1 et du dernier disque de zinc Z_2 est double de la force électro-motrice; si l'on continue à placer au-dessus du second couple un second disque de drap humide, puis un troisième couple A_3, Z_3, l'équilibre ne s'établit encore que lorsque la différence des états électriques A_1 et Z_3 est triple de la force électro-motrice; et en dernière analyse, l'équilibre n'existe dans la pile de Volta que lorsque la différence des états électriques du premier disque d'argent et du dernier disque de zinc est égale à autant de fois la force électro-motrice que cette pile contient de couples. Conséquences du principe de Volta.

Soit, par exemple, n le nombre des élements d'une pile isolée et $+2$ la force électro-motrice; le premier disque d'argent sera chargé d'une quantité $-n$ d'électricité négative, et le dernier zinc de $+n$ d'électricité positive. Si cette pile communique par son extrémité argent avec le réservoir commun, l'état électrique de cette extrémité sera alors zéro; son extrémité zinc sera chargée d'une quantité $2n$ d'électricité positive, de façon que la tension de l'électricité à cette seconde extrémité sera proportionnelle au nombre des éléments.

Rien n'est plus facile à vérifier que la pile, composée comme nous venons de le dire, est chargée à ses deux extrémités d'électricités contraires; il suffit pour cela de mettre en communication avec le plateau conducteur du condensateur de Volta l'extrémité de la pile dont on veut vérifier

l'état électrique; mais si l'on veut vérifier par la méthode expérimentale la loi de proportionnalité entre les tensions extrêmes et le nombre des éléments de la pile en employant le plan d'épreuve et la balance électrique, il est facile de se convaincre que les tensions augmentent avec le nombre des couples; mais on trouve pour cette augmentation une loi moins rapide que celle indiquée par le principe théorique de Volta, et qui n'est pas constante dans toutes les espèces de piles, qui peut même varier dans des limites assez étendues.

§ IV. *De la construction de la pile.*

2129. Trois corps différents entrent dans la construction de la *pile* ou *colonne de* Volta. Deux sont des métaux qui sont de très bons électro-moteurs; le troisième corps doit être un bon conducteur non métallique et faiblement électro-moteur; il doit exercer une action chimique sur un des deux métaux. Ceux qu'on a d'abord employés étaient l'argent et le zinc; bientôt on a substitué le cuivre à l'argent comme plus économique. Ainsi donc pour construire une pile à colonne, on place un disque de cuivre sur un autre en bois plus grand sur lequel s'élèvent trois colonnes en verre, entre lesquelles les disques sont placés. Sur le premier disque en cuivre est simplement juxtaposé un autre disque en zinc, ou bien on les soude ensemble, ayant trouvé qu'ils étaient ainsi plus efficaces; alors on peut donner plus d'épaisseur au zinc, qui s'use plus vite que l'autre: ces deux disques s'appellent un *couple*. Au-dessus on place une rondelle en carton humide ou en drap, puis un autre couple, en ayant toujours soin que le cuivre soit tourné en bas, et ainsi de suite; en ayant toutefois soin que le dernier métal soit le zinc, si l'on a commencé par le cuivre. Tel est l'admirable appareil au moyen duquel Volta est parvenu à développer et accumuler une tension électrique indéfiniment croissante, sans frottement, ni pression, et par l'influence du contact de certains métaux convenablement disposés. En faisant communiquer ces deux derniers disques chacun avec un fil en cuivre ou en platine, on a les deux *pôles* de la pile, l'électricité positive se montrant toujours à l'élément zinc, et l'électricité négative à l'élément cuivre. Aussi quand on touche les deux pôles de la

Pile à colonne. Fig. 612. Fig. 613.

pile avec les deux mains préalablement mouillées, on éprouve une commotion analogue à celles qui résultent d'une forte étincelle de la machine électrique ou d'une bouteille de Leyde; mais comme la pile opère toujours, la commotion est continue.

On a bientôt trouvé à cette pile plusieurs inconvénients. Le premier, c'est que les couples s'oxident facilement; l'oxide formé protège les métaux de l'action chimique, qui est le principal moteur dans les piles. Il fallait, toutes les fois qu'on remontait une pile, nettoyer les disques, et principalement les faces qui devaient être en contact, sans quoi on n'obtenait qu'une faible portion d'électricité. Ensuite chaque rondelle de drap laissait écouler une portion de liquide dont il était imprégné par la pression qu'exerçaient sur lui les disques superposés; ils devenaient alors moins bons conducteurs, et ensuite l'eau qui ruisselait du haut en bas neutralisait en partie les effets de la pile, en faisant par la conductibilité communiquer les deux extrémités de l'instrument.

2130. Quoi qu'il en soit, nous allons nous servir de cet instrument pour faire connaître plusieurs propriétés remarquables qui sont communes à toutes les dispositions de la pile. Dans une pile isolée, l'arrangement définitif de l'électricité est tel que le milieu est à l'état naturel, et que les deux moitiés sont chargées de fluides électriques contraires. L'épaisseur de ces fluides augmentant en passant d'un couple au suivant, ce résultat, qui est un corollaire immédiat du principe de Volta (2127), peut être démontré expérimentalement au moyen d'un condensateur à taffetas et d'un électroscope. Examinons maintenant ce qui doit arriver lorsqu'on met en communication avec un fil métallique les pôles d'une pile en activité: chacun des fils, étant un conducteur parfait, partagera le fluide du pôle avec lequel il communique, et ces deux pôles chargés d'électricité contraire étant mis en présence devront donner une continuelle recomposition. On observe, en effet, que, lorsque ces deux pôles sont approchés à une petite distance, il jaillit continuellement des étincelles qui constituent un courant de feu continu.

Propriétés de la pile.

Si on réunit ces deux pôles par un bon conducteur, les étincelles disparaissent, mais les effets électriques ne sont pas détruits pour cela; les fluides opposés se développent et



s'accumulent comme par le passé, et ils se recomposent continuellement au moyen du corps conducteur qui unit les deux pôles de la pile. Il est très facile de démontrer cette action continue par les expériences suivantes. Si la communication entre les deux pôles est établie au moyen d'un fil métallique très fin, si ce fil est long il s'échauffe immédiatement; s'il est plus court il peut rougir, entrer en fusion, et, suivant la nature du métal, ou rester continuellement incandescent sans altération, ou fondre en brûlant avec l'oxigène de l'air. La plupart des corps, pourvu qu'ils soient légèrement conducteurs, éprouvent de bien remarquables effets que nous décrirons plus loin lorsqu'on les place entre les pôles de la pile.

Force et tension de la pile.

Force physique et force chimique de la pile.

2131. Avant d'aller plus loin, nous devons distinguer avec soin dans la pile la force physique et la force chimique. La première de ces deux forces dépend de la quantité d'électricité qu'une pile peut donner dans un instant; la seconde dépend de la tension avec laquelle cette électricité s'écoule d'un pôle à l'autre. La *quantité d'électricité* qu'une pile peut donner dépend de la surface des éléments; elle est proportionnelle à l'étendue de cette surface. Quand les autres conditions restent constantes, la *tension* de la pile est proportionnelle au nombre des éléments. Il ressort de ces principes que les piles qui ont un grand nombre d'éléments ont une grande tension, c'est-à-dire que les courants qu'elles produisent peuvent vaincre une grande résistance. Ainsi, s'agit-il de produire de *grands effets physiques*, lorsque les électricités peuvent se réunir par de bons conducteurs, ces effets ne dépendront que de la quantité d'électricité, c'est-à-dire de l'étendue des surfaces des éléments; s'agit-il de produire des effets chimiques ou physiologiques, comme les électricités opposées ne peuvent se réunir que par des conducteurs imparfaits, les résultats produits seront proportionnels à la tension, c'est-à-dire au nombre des éléments. Ainsi, on comprend sans peine qu'une pile peut être très forte physiquement et très faible chimiquement, et réciproquement.

§ VI. *Des causes qui influent sur la charge de la pile.*

Influence

2132. Nous avons vu précédemment que Volta avait ad-

mis que le seul contact des métaux ou d'autres substances hétérogènes suffisait pour développer de l'électricité; mais depuis les premiers travaux de cet illustre physicien, on a étudié avec soin toutes les circonstances qui peuvent influer sur le développement de l'électricité dans l'appareil qu'il avait inventé, et on n'a pas tardé à s'apercevoir que l'action chimique qui s'exerçait entre les parties constituantes de la pile, avaient une grande influence sur sa charge. Pepys d'une part, M. Biot et F. Cuvier de l'autre, démontrèrent que l'oxigène de l'air a une influence marquée sur la marche de la pile. Fabroni et Crève essayèrent d'établir expérimentalement que les effets électriques produits dans le contact de deux métaux devaient être attribués à l'action chimique. Wollaston s'appliqua à démontrer qu'il en était de même dans la pile, et il posa en principe : que l'oxidation du métal était la cause principale des phénomènes électriques.

De l'oxidation sur la charge de la pile.

Electricité développée dans les actions chimiques.

2133. Un fait qui depuis a reçu un grand nombre de confirmations, et qui a contribué à donner beaucoup de poids à l'opinion de Wollaston, c'est qu'en employant le condensateur de Volta, on peut prouver qu'il y a de l'électricité développée dans les actions chimiques. Si, par exemple, on place sur le plateau collecteur un disque de papier mouillé, et sur ce disque un vase de zinc dans lequel on verse de l'acide sulfurique affaibli, cet acide exerce une action énergique sur le zinc. Si on plonge dans ce liquide une tige de platine communiquant avec le sol, le condensateur donne bientôt des signes évidents d'électricité. M. Becquerel a varié cette expérience de plusieurs manières, et il a démontré qu'il y a un développement constant d'électricité lors de l'action chimique des acides sur les bases, des alcalis sur les sels et des sels entre eux, et qu'en définitive on doit admettre que toute action chimique, quelque faible qu'elle soit, est accompagnée de développement d'électricité.

Démonstration des actions chimiques dans la pile.

2134. Il reste maintenant à démontrer qu'il y a constamment dans la pile des actions chimiques mises en jeu; pour avoir la preuve de ce fait important, on a varié les expériences à l'infini; mais voici les plus concluantes, qui sont dues à M. Delarive. Si on place une pile au milieu d'un gaz qui ne peut exercer aucune action chimique sur les métaux de la pile, tels que l'acide carbonique ou l'hydrogène, on

trouve de cette manière que les métaux accouplés qui donnent les phénomènes électriques les plus développés, lorsque la pile qu'ils composent est au milieu de l'air, ne donnent plus aucun signe d'électricité quand l'appareil est entouré d'un gaz qui n'a aucune action sur eux. Si l'on tient à la main la partie zinc d'un couple composé de plaques de zinc soudées bout à bout (fig. 611), tandis que la partie cuivre touche le plateau du condensatenr, on obtient des signes d'électricité sensibles. Il semble, au premier abord, qu'il n'y a point là d'action chimique en jeu; mais M. Delarive a montré que ce dégagement d'électricité provient de ce que l'humidité due à la transpiration cutanée exerce sur le zinc une action chimique.

Si, au lieu de tenir le zinc avec les doigts, on le tient avec une pince en bois suffisamment conductrice, on n'observe plus aucun signe d'électricité. Si, tenant l'élément zinc avec la main, on dépose sur ce métal quelques gouttes d'acide sulfurique, l'électricité recueillie est beaucoup plus abondante. Davy avait précédemment démontré qu'un liquide pouvait remplacer dans la pile un métal, et on a démontré depuis que le rôle des liquides n'était pas simplement celui de conducteurs, comme on le supposait dans la théorie de Volta, mais qu'ils exerçaient dans la pile une action comparable à celle des métaux, et qui peut même l'emporter sur cette dernière.

Il ressort de l'ensemble des faits que nous venons de présenter, que l'opinion de Volta sur la cause du développement de l'électricité dans la pile doit subir des modifications, et que l'on doit tenir un compte très grand dans les théories qu'on proposera des actions chimiques qui s'exercent, toujours quand cet appareil est en activité. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet intéressant.

§ VI. *Différentes dispositions de la pile.*

Pile multiple de Van Marum.

2135. Nous avons fait remarquer, en finissant la description de la pile à colonne, les inconvénients qu'elle présentait; pour remédier à celui que la pression des couples sur les rondelles humides occasionnait, Van Marum avait proposé de distribuer la pile en plusieurs colonnes; mais cette

disposition faisait naître un autre inconvénient, en ce qu'en faisant les colonnes trop petites il fallait trop les multiplier.

2136. Volta a inventé une forme nouvelle de pile, que l'on a désignée sous le nom de pile à couronnes ou à tasses. Pour la construire on soude, pour chaque couple, bout à bout, les deux éléments zinc et cuivre; on les recourbe de façon à pouvoir les plonger par leurs extrémités dans des verres contenant une dissolution acide ou salée, mais sans que les deux extrémités de deux couples cuivre et zinc, qui plongent dans le même verre, puissent se toucher. Dans cette construction, le liquide, rendu plus conducteur par l'acide ou le sel qui y est dissous, fait fonction des rondelles humides employées dans la pile à colonne, et chaque arc métallique est un élément de la pile. Cette pile a peu d'énergie, parce que l'intervalle qui sépare les deux éléments, et qui est occupé par le liquide, dont la conductibilité est médiocre, est insuffisante. Pile à couronnes. Fig. 614.

2137. La pile à auge qui a été inventée plus tard, par Cruikshanks, est formée de couples rectangulaires soudés ensemble. Ces couples sont mastiqués dans les rainures d'une caisse en bois horizontale qu'elle divise ainsi en compartiments ou cases égaux entre eux. Veut-on mettre cette pile en activité, on n'a qu'à remplir ces cases avec de l'eau acidulée. Deux fils en métal plongés dans les deux cases extrêmes se chargent alors de l'électricité que l'appareil accumule sans cesse aux deux extrémités de la caisse. Pile à auges. Fig. 615.

On peut ensuite faire communiquer deux ou un plus grand nombre de ces caisses, disposées de la même manière, en établissant la communication par un fil métallique; on peut à volonté augmenter ainsi la tension, c'est-à-dire la force chimique de la pile. Ainsi, par exemple, deux piles ayant chacune 100 couples de 1 décimètre carré, dont le pôle positif de la première communique au pôle négatif de l'autre, seront comme une pile ayant 200 couples de même grandeur. La tension sera doublée, mais la force physique restera la même, parce qu'un seul couple ayant deux fils métalliques assez courts et assez épais, peut produire les mêmes effets physiques qu'un grand nombre de couples ayant la même surface; mais fait-on communiquer les deux pôles positifs ensemble, et les pôles négatifs ensemble, on aura Batteries voltaïques.

une batterie de la tension de 100 couples seulement ; mais la force physique en sera augmentée, comme si les couples avaient 2 centimètres carrés chacun.

Pile de Wollaston. Fig. 616.

2138. Wollaston a imaginé une forme de pile qui est très avantageuse dans beaucoup de circonstances. Les plaques de cuivre et de zinc, soudées ensemble par un prolongement droit, comme l'indique la figure, sont fixées à une traverse de bois qui permet de les plonger immédiatement dans une série de vases en verre séparés, de sorte que chaque couple plonge dans son vase, qui contient le liquide acidulé. Le couple qui plonge dans le même vase se compose du cuivre d'un des éléments et du zinc de l'élément suivant. Ces deux métaux doivent être contournés de manière à ne pas se toucher.

Cette disposition a de grands avantages : on peut faire commencer ou cesser l'action quand on veut ; on n'a pour cela qu'à plonger ou à retirer les couples attachés à la traverse. Le fluide électrique qui se développe sur le zinc peut en sortir par tous les points de la surface ; ensuite, il n'a qu'une couche de liquide très mince à traverser pour se porter sur le cuivre.

Pile en hélice.

2139. Lorsqu'on veut produire avec la pile des phénomènes qui n'exigent point une grande tension, mais un grand développement d'électricité, on peut adopter une disposition très convenable ; l'appareil est connu sous le nom de pile en hélice. Il se compose de deux lames de cuivre et de zinc parallèles, dont l'ensemble est contourné en forme de spirale, mais qui ne se touche nulle part ; les spires sont séparées par un tissu d'osier qui les maintient à un petit intervalle ; au milieu se trouve un noyau en bois auquel tout l'appareil est fixé et qui sert à le soulever. En le plongeant dans un baquet contenant un liquide acide, on a ainsi de très grandes surfaces en contact avec le liquide. On y reçoit ordinairement les extrémités des lames en fils ou en rubans métalliques, que l'on réunit par les corps conducteurs sur lesquels il s'agit d'observer les effets produits par l'électricité en mouvement.

On peut produire de grands effets de tension et d'électricité accumulée en réunissant plusieurs éléments en hélice, comme la précédente.

Les différentes piles dont nous venons de parler présentent des intensités d'action très variables, les liquides conducteurs ou excitateurs restant les mêmes; cela tient évidemment aux combinaisons chimiques qui se produisent et aux dépôts qui recouvrent bientôt les lames. On est parvenu à construire des piles à courants constants, que nous décrirons en exposant plus loin les principaux phénomènes électrochimiques.

2140. M. Marianini a observé un fait important relativement à l'influence variable de l'étendue des plaques, cette étendue restant constante pour une plaque. Si on augmente progressivement celle de l'autre, l'intensité du courant croît beaucoup plus rapidement quand on augmente l'étendue de la surface du cuivre que celle du zinc. Tous les couples que l'on forme en combinant entre eux le zinc, le fer, le plomb, l'étain, le cuivre, le laiton, l'argent, l'or, le platine, donnent ce résultat général, qu'en augmentant la surface baignée du métal négatif, on augmente beaucoup plus les effets de l'appareil que par le changement contraire. L'effet d'un couple de cuivre et de zinc à plaques égales ne change pas lorsqu'on réduit la surface de zinc à $1/7^e$ de son étendue, si l'on augmente celle du cuivre de $1/8^e$ ou de $1/7^e$ au plus. La loi que suit l'intensité de l'électricité développée suivant les dimensions des plaques n'a pas encore été régulièrement établie par l'expérience dans les cas donnés les plus importants.

Influence de l'étendue diverse des plaques.

§ VII. *Effets de la pile.*

2141. On distingue trois classes de phénomènes que l'on peut faire naître avec la pile voltaïque, les effets physiologiques, physiques et chimiques. Pour étudier avec soin ces phénomènes, il faut connaître les lois qui régissent le développement et le mouvement de l'électricité dans la pile. Ces lois ne seront exposées que plus tard; nous devons donc nous borner ici à citer les exemples les plus saillants et les plus faciles.

Les effets de la pile sont déterminés par le passage continu de l'électricité, ou par des *courants électriques* qui s'établissent lorsque les deux pôles de l'appareil sont mis en communication par un corps conducteur, ou quand ils sont assez

Courants électriques.

voisins pour que les électricités de nom contraire puissent s'unir en franchissant l'intervalle qui les sépare. Quand les deux pôles de la pile sont réunis par des corps conducteurs, on dit alors que le circuit voltaïque est formé.

Circuit voltaïque.

Effets physiologiques.

2142. L'électricité développée par la pile exerce sur les animaux une influence d'autant plus prononcée qu'elle traverse les organes avec continuité; c'est cette action continue qui distingue les effets produits avec la pile de ceux produits avec la bouteille de Leyde. La commotion que l'on ressent en touchant avec les deux mains mouillées les pôles opposés d'une pile, peut être aussi vive que celle produite par la décharge d'une batterie électrique. En formant une chaîne de plusieurs personnes pour réunir les deux pôles de la pile, la commotion n'est ordinairement sentie que par les personnes les plus voisines des pôles. L'énergie de la commotion augmente toujours avec le nombre des éléments de la pile; elle dépend, en effet, de la tension des fluides aux pôles, et cette tension augmente, comme nous l'avons vu, avec le nombre des couples.

Commotion voltaïque.

On emploie l'électrisation par la pile dans tous les cas de paralysie sans altérations organiques et dans toutes les affections atoniques.

L'application d'un courant galvanique aux organes des animaux récemment morts a donné lieu à une foule de phénomènes intéressants. Indépendamment des muscles des animaux qui, comme ceux de la grenouille, se contractent fortement lorsqu'on les comprend dans un circuit galvanique, ou seulement lorsqu'on les touche avec le fil d'un des pôles de la pile, les cadavres humains ont été soumis à de semblables épreuves. On a vu, en Angleterre, un homme mort depuis trois quarts d'heure exécuter des mouvements respiratoires, et mouvoir ses membres, de manière à donner l'espérance de le rappeler à la vie, si la trop grande quantité de sang qu'il avait perdue ne se fût opposée à cet heureux succès. Il résulte, du moins, de la puissante influence du fluide galvanique, qu'il offre le meilleur moyen de rétablir la circulation et la respiration chez les individus asphyxiés.

MM. Lehot et Marianini ont trouvé cette loi remarquable, que quand le courant positif du circuit voltaïque se propage

dans les nerfs, ou suivant leurs ramifications, il produit une contraction musculaire au moment où il commence, et une sensation quand il cesse; tandis que s'il se propage en sens inverse des ramifications des nerfs, il produit une sensation quand il subsiste, et une contraction au moment de son interruption.

2143. Les effets physiques que la pile peut produire dépendent surtout de la dimension que l'on donne aux couples métalliques et à leur nombre. Nous avons précédemment énoncé ce fait. Les effets physiques qu'un courant d'électricité peut produire sont, de même que ceux d'une décharge des batteries ordinaires de la chaleur, de la lumière et du magnétisme. — Lorsqu'un fil métallique assez fin et assez court, et dont surtout la conductibilité pour l'électricité est moindre que celle du fil de cuivre que l'on emploie ordinairement, établit une communication directe entre les deux pôles de la pile, ou qu'on le fait entrer dans le circuit des fils de cuivre qui servent de pôles, ce fil s'échauffe jusqu'au rouge, au rouge blanc, et souvent même il se fond et se volatilise. Comme l'action de la pile est continue, cet effet se maintiendrait toujours, si la pile, par l'action chimique qu'exerce la liqueur acidulée sur les métaux, ne détruisait pas les couples eux-mêmes. Le platine est fondu. Le fer se liquéfie aussi plus facilement encore; mais comme c'est un métal très oxidable, il brûle avec un grand éclat. De minces feuilles d'argent sont volatilisées partout où le contact a lieu, et comme alors il y a solution de continuité, on voit sillonner ces interstices par une lumière vive et verdâtre. Comme on le voit, l'électricité de la pile pour franchir de petits intervalles entre les corps conducteurs émet des étincelles électriques, comme la machine à frottement. Seulement, comme ici encore l'action est continue, on voit une étincelle succéder à la première, ensuite une troisième, et l'action de la pile est assez forte, on voit un trait de feu entre les deux corps conducteurs.

Effets physiques de la pile.

On doit à H. Davy une expérience très curieuse, quand, au lieu de mettre les deux pôles immédiatement en communication imparfaite, on termine chaque extrémité par un petit cône de charbon bien calciné pour le rendre meilleur conducteur. Quand on met ces deux cônes de charbon à une

petite distance l'un de l'autre, et que l'on établit la communication entre les deux pôles d'une forte pile, au lieu d'une simple étincelle, on aperçoit une lumière éblouissante entre les deux pôles. Cette lumière est si vive que l'œil peut à peine la supporter. Cet éclat n'est pas dû à la combustion du charbon, qui naturellement brûle quand on fait l'expérience dans l'air libre ; car en la faisant dans le vide, il n'est pas moins éblouissant. Voilà comme on dispose cette expérience. Dans un ballon de 30 centimètres de diamètre, on pratique deux petites ouvertures opposées l'une à l'autre, et garnies de cuir, par lesquelles on fait passer deux fortes tiges métalliques qui peuvent par cette disposition s'approcher ou s'éloigner à volonté l'une de l'autre; à leur extrémité, on adapte les deux cônes de charbon fortement calcinés et éteints dans le mercure; alors on fait le vide dans l'appareil; puis après avoir mis les deux tiges en communication avec les deux pôles de la pile, on approche les deux charbons à une petite distance; et à l'instant même on voit apparaître cette lumière éblouissante dont on ne peut comparer l'éclat qu'avec les rayons solaires. Alors on peut écarter peu à peu les tiges, le courant traverse le vide à une assez grande distance, et le ballon est rempli d'un faisceau lumineux.

Effets chimiques de la pile.

2144. Pour produire des effets chimiques d'une certaine intensité, il ne s'agit plus tant de la grandeur des couples que de leur nombre. C'est à Carlisle et Richardson que nous devons la découverte des premiers et des plus importants effets de la pile. En voulant répéter les expériences de Volta, ces deux physiciens ont construit au commencement de ce siècle (le 30 avril 1800) une pile à colonne avec des pièces de monnaie, des plaques de zinc et des rondelles de carton imprégnées d'eau pure. Quand après plusieurs essais ils sentirent l'odeur particulière de l'hydrogène, ils en conclurent que cette odeur ne pouvait être due qu'à la décomposition de l'eau. M. Richardson alors, pour vérifier si l'électricité était la véritable cause de cette décomposition, fit passer le courant dans un tube plein d'eau par le moyen de deux fils métalliques disposés à une petite distance l'un de l'autre, et bientôt il vit l'hydrogène paraître en petites bulles tout autour du pôle négatif, et l'oxigène en partie seulement au pôle positif. Je dis en partie, parce qu'en employant du

Décomposition de l'eau par la pile.

cuivre comme conducteur, le reste d'oxigène oxidait le fil du cuivre.

Si l'on veut savoir si les deux gaz sont réellement dans la proportion pour former de l'eau, on emploie l'appareil suivant. EE est un entonnoir en verre, dont la douille BB assez large est fermée par un bouchon en liége, à travers lequel on fait passer deux tubes de verre distants l'un de l'autre d'un centimètre à peu près; on fait dépasser d'un peu les extrémités extérieures et intérieures des deux surfaces du bouchon. On fait passer alors dans ces deux tubes deux fils de platine qu'on y scelle avec de la gomme laque, de sorte que les tubes soient parfaitement bouchés. On fait passer ces deux fils à travers les tubes, de manière qu'ils s'élèvent parallèlement dans l'intérieur de l'entonnoir jusqu'à la hauteur de 4 ou 5 centimètres à peu près. On verse de l'eau dans l'entonnoir, et on renverse sur chaque fil une petite cloche, également remplie d'eau. Alors, pour faire marcher l'appareil, on n'a plus qu'à mettre les extrémités inférieures des deux fils de platine en communication avec les deux pôles d'une pile assez énergique. Après quelque temps de décomposition, quand on observe l'appareil, on voit que le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxigène; c'est ce dont on peut facilement se convaincre en faisant usage de cloches graduées. Fig. 617.

Quand on prend de l'eau distillée pure, l'opération marche très lentement, parce que l'eau pure est assez mauvais conducteur de l'électricité; on peut la faire aller bien plus rapidement en rendant l'eau plus conductrice en y ajoutant une petite quantité d'un acide ou d'une dissolution saline.

2145. C'est surtout H. Davy qui, par ses admirables expériences et ses heureuses applications, a le plus contribué à agrandir le champ immense de l'électro-chimie. C'est lui qui dans un mémoire lu à la Société royale de Londres explique le fait suivant, encore obscur jusqu'à lui. En décomposant de l'eau distillée avec la pile dans des vases de verre, on avait de la soude au pôle négatif, et du chlore au pôle positif. Il avait observé que dans le cas où il obtenait beaucoup de chlore, le verre était fortement attaqué, au point de contact avec le fil conducteur, et il dut nécessairement conclure que la production de l'alcali était due à la décomposi- Expériences de H. Davy.

tion du verre même; pour le prouver, il fit l'expérience dans des vases en or, et alors il n'y avait plus de traces d'alcali quand il avait opéré sur de l'eau distillée par lui-même avec le plus grand soin. Car en opérant sur de l'eau distillée ordinaire qui par tous les réactifs ne dénote aucune substance étrangère, on obtient encore des réactions acides ou alcalines; car dans la décomposition de l'eau, non seulement celle-ci est décomposée, mais encore tous les sels qu'elle pourrait tenir en dissolution. Ainsi quand, au lieu de mettre dans l'entonnoir précédemment décrit et dans les cloches une dissolution de sulfate de soude et la colorant avec la teinture de chou rouge, on voit aussitôt que l'on a mis les deux fils de platine en communication avec la pile, la liqueur, contenue dans la cloche du pôle positif rougir par l'acide sulfurique qui s'y porte avec l'oxigène de l'eau décomposée, et celle du pôle négatif se colorer en vert, par l'action que la soude attirée vers ce pôle exerce sur la couleur végétale.

Décomposition des alcalis et des terres par la pile.

2146. Les découvertes les plus importantes de Davy sont sans contredit l'action de la pile sur les alcalis et sur les terres non encore décomposées avant lui. Davy avait déjà, long-temps avant la réalisation de ses théories, le pressentiment des grandes découvertes dont il devait enrichir la science, puisqu'il pronostiqua que le mode d'actions chimiques de la pile pourrait conduire à la découverte de corps simples, si les composés sur lesquels on agirait étaient employés dans un grand état de concentration, et si la pile était d'une tension et d'une énergie suffisantes. Voici ce qu'il observa en décomposant d'abord la potasse: il s'aperçut que l'eau était un obstacle à l'accomplissement du phénomène; qu'il fallait employer la potasse ayant subi la fusion ignée. Pendant toute la durée de l'expérience, il vit au pôle négatif de la pile une vive lumière, et au point de contact une colonne lumineuse, d'où il conclut que cette lumière était due à l'oxidation d'une matière combustible; en opérant de cette manière il ne put donc jamais obtenir cette matière combustible. Il y parvint en humectant légèrement la potasse, la plaçant sur une lame de platine mise en contact avec le pôle négatif d'une batterie de 250 paires, tandis qu'il forma le circuit avec un fil de platine. L'action qui se

manifestait alors fut très vive, et du côté du pôle négatif, il observa quelques points brillants dans la potasse fondue par la chaleur. Il vit que ces globules étaient inflammables et que ceux qui ne brûlaient pas se couvraient bientôt d'une couche terne qui n'était autre chose que de la potasse. Ces globules inflammables étaient donc la base de la potasse. Il obtint de même celle de la soude, quoique un peu plus difficilement; et ces deux nouveaux corps furent appelés potassium et sodium.

Le Dr Sebeck a trouvé le moyen de recueillir le potassium avec moins de perte. Voici comment il opère : il forme une petite capsule avec un morceau de potasse caustique ; il remplit alors cette capsule de mercure, et la pose sur une lame de platine, communiquant au pôle positif de la pile ; puis il met le mercure en contact avec le pôle négatif. La décomposition ne tarde pas à avoir lieu pendant que l'oxigène se dégage sur le platine ; le potassium s'unit au mercure et forme un amalgame qui est assez stable ; on peut facilement ensuite séparer le mercure par la distillation dans la vapeur de l'huile de pétrole. Le potassium resté à l'état de pureté dans la cornue. On le conserve dans un flacon plein de pétrole. La chaux, la baryte, la strontiane, traitées de la même manière, donnent aussi des signes de décomposition, mais à la vérité bien plus difficilement que la potasse ou la soude.

2147. Tous les sels sont décomposés par la pile ; mais ils présentent des phénomènes beaucoup plus variés, dépendant, soit de la force de la pile ou de la stabilité de l'acide ou de la base, ou de leur facile décomposition. Décomposition des sels par la pile.

Quand la tension de la pile n'est pas trop forte et que l'acide et la base se décomposent difficilement, ces deux composés sont seulement séparés ; l'acide est toujours attiré vers le pôle positif, tandis que la base va vers le pôle négatif. Quand l'oxide seul est facilement décomposable, alors non seulement il est séparé de l'acide, mais encore il est réduit. Son métal va toujours vers le pôle négatif, tandis que l'oxigène et l'acide vont au pôle positif. Quand c'est l'acide qui se décompose facilement, il est lui-même décomposé, ou bien ; si la pile n'est pas suffisamment forte, seulement désoxigéné, et l'oxigène qu'il perd vient au pôle positif, le radical et l'oxide au pôle négatif. Si enfin tous les deux

l'acide et l'oxide, peuvent se décomposer; l'oxigène et de la base et de l'acide se rendent au pôle positif, et le métal de l'oxide et le radical de l'acide se rendent au pôle négatif.

Transport des éléments par la pile.

2148. Sir H. Davy, en voyant les circonstances remarquables qui accompagnaient la décomposition des sels, étudia encore le phénomène très étonnant du transport. Nous donnerons ici seulement un extrait fort abrégé de ses importantes recherches. Il fait communiquer entre eux, au moyen de filaments humides d'amiante, deux vases, l'un contenant une dissolution saline et l'autre de l'eau distillée; puis, faisant communiquer le fil positif de la pile avec le premier vase, et le fil négatif avec le second, des phénomènes très curieux se passent alors : si l'oxide n'est pas décomposé, il voyage du premier vase sur l'amiante, traverse l'eau et se rend au pôle négatif; s'il est réduit au contraire, c'est le métal qui passe. Si l'on prend, par exemple, du nitrate d'argent, toutes les fibres de l'amiante se recouvrent d'une infinité de petites parcelles d'argent métallique. Il plaçait ensuite la dissolution saline entre deux vases d'eau pure, les trois vases communiquant entre eux par l'amiante; il vit qu'en plongeant les deux pôles de la pile dans les deux vases contenant simplement l'eau, la dissolution saline du milieu était encore décomposée; l'acide est transporté au pôle positif, la base au pôle négatif.

Davy disposa ensuite trois vases; le premier contenant de l'eau pure, le troisième une dissolution saline, et celui du milieu de l'eau bleuie avec le sirop de violettes. Après avoir mis en communication les deux pôles avec les deux vases extrêmes, le sel fut encore décomposé par le courant, et dans le vase d'eau pure, il trouvait ou l'acide ou l'oxide suivant qu'il avait disposé les pôles dans un sens ou dans un autre. Mais voilà ce qu'il y a d'extraordinaire : l'eau colorée ne rougit ni ne verdit quand l'acide ou l'oxide la traversait; rien n'est cependant plus sûr que l'un ou l'autre était en contact avec cette eau pendant un certain temps. Les corps semblent donc perdre toute leur réaction chimique pendant le temps qu'ils sont sous l'influence de l'électricité.

Cependant, si l'on substitue à la teinture végétale une dissolution alcaline ou une dissolution acide très concentrée, il y a des acides ou des oxides qui ne peuvent traverser ces dis-

solutions et qui manifestent ainsi leur affinité chimique qui, dans l'expérience précédente, avait été détruite par l'influence électrique.

2149. Une des expériences les plus curieuses qu'on ait exécutées avec la pile, est celle qu'on doit au docteur Seebeck, et par laquelle nous allons terminer ce résumé rapide. Si l'on met quelques grammes de mercure dans une petite capsule de chlorhydrate d'ammoniaque; si on pose cette capsule sur une lame de métal communiquant au pôle positif d'une forte pile, dès qu'on touche le mercure avec le fil négatif on le voit augmenter immédiatement, prendre la forme d'un champignon qui déborde la capsule et qui est d'un volume cinq ou six fois plus considérable que le volume primitif. Ce corps est un véritable amalgame composé de mercure et d'un corps qui a la plus grande analogie avec le potassium, et qui cependant contient, comme l'ammoniaque, de l'hydrogène et de l'azote, et n'en diffère que par un équivalent d'hydrogène en plus. Nous renvoyons aux ouvrages de chimie pour les détails de cette très remarquable réaction. **Expériences de Sebeck, production de l'amalgame d'ammonium.**

§ VIII. *Des piles sèches.*

2150. Hachette et Désormes remplacèrent le liquide dans la pile à colonnes par la colle d'amidon. Deluc trouva plus tard une combinaison de couples voltaïques qui fonctionnaient en apparence sans l'intermédiaire d'un liquide. Cette pile consistait en une colonne formée de disques de zinc et de disques de papier doré d'un côté seulement, le zinc en contact avec la face dorée. L'humidité du papier suffisait pour développer de l'électricité. Zamboni perfectionna l'appareil de Deluc. Il entassa, comme ce dernier, en les pressant fortement les uns contre les autres, des milliers de disques de papier dont l'une des surfaces étant étamée, l'autre est recouverte d'une couche très mince de per-oxide de manganèse broyé avec un mélange de farine et de lait. L'humidité du papier sert encore dans cette pile, comme dans celle de Deluc, au développement du fluide électrique et à sa propagation; mais en raison du peu de conductibilité du papier, la circulation du fluide électrique est beaucoup plus lente que dans les piles ordinaires. **Appareil de Hachette et de Deluc.** **Piles de Zamboni.**

Quand on a détruit par le contact la tension d'une semblable pile, il faut un temps très long pour qu'elle puisse revenir à son maximum, qui lui-même est très variable suivant l'état hygrométrique de l'air, en sorte que pour que ces piles jouissent de toute leur puissance, il faut les enfermer dans une cloche de verre.

On comprend également que ces piles ne doivent exercer des actions chimiques qu'avec la plus grande difficulté ; car il faut, pour les produire, des courants beaucoup plus rapides que ceux que l'on peut obtenir au moyen de ces appareils.

Les piles sèches paraissaient tout-à-fait opposées à la théorie chimique de la pile ; en effet, on ne pourrait facilement comprendre une action chimique entre des surfaces métalliques parfaitement exemptes d'humidité ; mais en examinant avec soin la constitution de ces instruments, on voit que les piles sèches ne sont sèches que de nom, et que l'humidité est indispensable à leur action. Au bout de quelques années tout signe d'électricité disparaît. Dans les derniers temps où cette action s'affaiblit, on peut lui rendre une partie de son énergie primitive en exposant la pile à une forte chaleur. Les piles sèches sont surtout remarquables par la durée de leur action. On avait d'abord pensé avoir, au moyen des piles sèches, une source indéfinie d'électricité ; mais on n'a pas tardé à s'apercevoir qu'à la longue ces instruments s'altéraient complétement.

Électroscope de Bohnenberger. Fig. 618.

2151. Les piles sèches ont été employées pour fabriquer un électroscope d'une grande sensibilité, inventé par Bonhenberger ; il consiste en une seule feuille d'or suspendue précisément à la même distance des deux pôles d'une pile sèche très faible. On conçoit que, dans l'état naturel, cette feuille d'or demeure immobile entre deux attractions égales et opposées, et qu'aussitôt qu'on lui communique la plus faible quantité d'électricité, elle est immédiatement attirée par un pôle et repoussée par l'autre, ce qui double la sensibilité de l'instrument.

La trop grande sensibilité de cet appareil peut nuire à son emploi, et même jeter des incertitudes sur ses indications ; en effet, le moindre frottement exercé par mégarde sur un plateau de condensateur suffit pour dénaturer les résultats que l'on devrait obtenir.

2152. On a obtenu, au moyen de piles sèches, un mouvement très durable qu'on avait d'abord regardé comme perpétuel, mais qui ne l'est pas plus que l'action de cet instrument. On observe ce mouvement en plaçant verticalement deux de ces piles à une légère distance l'une de l'autre et les faisant communiquer par leurs bases, de façon que leurs sommets présentent leurs pôles opposés. Dans cette situation, une aiguille métallique isolée très mobile, et suspendue par son centre de gravité, peut osciller continuellement entre les deux pôles. En effet, si elle est d'abord attirée par le pôle vitré, elle viendra le toucher, s'électrisera vitreusement, sera repoussée par le même pôle et attirée par le pôle résineux; au contact avec ce dernier pôle, elle perdra son électricité vitrée pour en prendre une résineuse et être de nouveau repoussée vers le pôle vitré qui l'attirera. Mouvement perpétuel. Fig. 619.



Au moyen d'une disposition particulière, on peut changer ce mouvement alternatif en un mouvement de rotation continu.



2153. Le diagomètre de M. Rousseau est un instrument qui repose sur une application de la pile sèche. Voici la description de cet appareil: une aiguille aimantée très fine et très légère est supportée par un pivot métallique; un disque de clinquant est porté par une de ses extrémités, et répond dans la direction magnétique de l'aiguille, vis-à-vis et très près d'un disque métallique vertical qui communique avec le pivot par un conducteur; le tout est posé sur un plateau de résine et recouvert d'une cloche. Le conducteur qui communique au pivot se porte aussi à l'extérieur de la cloche, où se trouve un plateau métallique sur lequel on pose les corps dont on veut essayer la conductibilité; sous le plateau de résine est une pile sèche dont un des pôles communique avec le réservoir commun, tandis que l'autre peut être mis en contact avec le plateau métallique extérieur. A l'instant où ce contact a lieu, le disque métallique fixe est électrisé, en même temps que l'aiguille et son disque mobile; il en résulte une répulsion qui dérange la direction de l'aiguille aimantée d'un certain nombre de degrés, qu'on peut déterminer au moyen d'un arc gradué. Lorsqu'on agit comme nous venons de le dire, la déviation de l'aiguille est instantanée et arrive aussitôt à son maximum; mais si l'on pose Diagomètre de Rousseau.



sur le plateau de cuivre un conducteur très imparfait, comme un morceau de verre par exemple, et que l'on force l'électricité à le traverser, la déviation de l'aiguille n'arrive à son maximum que dans un temps très long. Si le corps était complétement isolant, la déviation ne s'apercevrait jamais. Il en résulte que la durée du temps qui s'écoule entre le contact et le maximum de déviation est une bonne mesure du degré de conductibilité des corps interposés.

Ce moyen facile de constater la conductibilité peut être très précieux pour reconnaître des conditions moléculaires de plusieurs substances. Ainsi, M. Rousseau a vu que le meilleur charbon pour la poudre de guerre était celui de tous qui conduisait le moins bien l'électricité. Il a trouvé que l'huile d'olive pure conduisait à peine l'électricité, tandis que l'huile de graines qu'on emploie souvent pour la falsifier, la conduit très bien. La différence est telle, qu'une très petite quantité de ces huiles ajoutée à l'huile d'olive pure suffit pour augmenter beaucoup son pouvoir conducteur.

CHAPITRE II.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES.

§ I. *Découverte de l'électro-magnétisme.*

Expériences d'Œrsted.

2154. Nous avons vu dans le chapitre précédent que lorsqu'une pile de Volta est fermée par un corps bon conducteur qui réunit les pôles, tout signe d'électricité libre disparaît ; le courant qui parcourt le circuit fermé produit ou l'incandescence des fils ou d'autres phénomènes que nous avons précédemment exposés. En 1820, Œrsted, professeur de chimie à Copenhague, guidé par des vues théoriques qu'il avait publiées vingt ans avant, découvrit un autre fait aussi remarquable qu'inattendu : si une aiguille aimantée est placée à peu de distance d'un fil métallique qui joint les deux

extrémités d'une pile, elle éprouve de la part de ce fil une action révolutive telle que; si l'aiguille se trouve au-dessus ou au-dessous du fil, elle est aussitôt déviée à angle droit, dans un sens ou dans un autre; si on la place à droite ou à gauche, elle s'incline d'un côté ou de l'autre, et enfin le sens de la déviation et celui de l'inclinaison changent suivant que l'électricité positive arrive d'un côté ou de l'autre du fil.

La force qui s'exerce ainsi entre le courant de la pile et le magnétisme de l'aiguille, est ce que l'on nomme *la force électro-magnétique*.

Action du courant sur l'aiguille aimantée.

2155. Pour produire les phénomènes électro-magnétiques, il faut, comme le fait OErsted, établir la communication entre les deux extrémités de la pile par une tige métallique *z m c*, qui puisse être facilement recourbée en tous sens. On dispose ensuite sur un pivot à pointe fixe une aiguille aimantée horizontale, bien mobile AB; puis, lorsqu'elle s'est fixée sur la direction que lui assigne la force magnétique de la terre, on prend une portion flexible du *fil conjonctif*, comme l'appelle OErsted, et l'ayant tendue parallèlement à l'aiguille, on l'approche doucement d'elle, soit par-dessus, soit par-dessous, ou à droite ou à gauche; aussitôt on la voit dévier, et, ce qui n'est pas moins remarquable, le sens de la déviation change selon le côté par lequel le fil conjonctif se présente à elle. Pour bien faire comprendre ce phénomène, nous allons en exposer d'après M. Biot toutes les particularités. Supposons que le fil conjonctif s'étende horizontalement du nord au sud, dans la direction même du méridien magnétique où l'aiguille se fixe, et que son extrémité nord soit attachée au pôle cuivre de la pile, l'autre l'étant au pôle zinc. Concevons encore que la personne qui fait l'expérience regarde le nord, et par conséquent le pôle cuivre du fil. Cela posé, lorsque le fil est placé au-dessus de l'aiguille (fig. 621), le pôle nord de celle-ci marche vers l'ouest; si le fil est placé au-dessous (fig. 622), le pôle marche vers l'est; si l'on porte le fil à droite ou à gauche, l'aiguille n'est plus déviée latéralement, mais elle perd son horizontalité. Dans le premier cas, son pôle nord s'élève (fig. 623); dans le second, il s'abaisse (fig. 624). Or, en transportant ainsi le fil conjonctif tout autour de l'aiguille, suivant des directions pa-

Fig. 620. Fig. 621. Fig. 622. Fig. 623. Fig. 624.

rallèles entre elles, on ne fait que le lui présenter par des côtés différents de son contour circulaire, sans altérer en rien la tendance propre de l'aiguille vers les pôles magnétiqués terrestres. Puis donc que les déviations de la branche MA de l'aiguille observée dans ces positions successives, sont d'abord dirigées de droite à gauche, quand le fil est au-dessus de l'aiguille; puis de bas en haut, quand il est à droite; de gauche à droite quand il est dessous; et enfin de haut en bas quand il est à gauche, conformément au sens de rotation indiqué par des flèches (fig. 625), il faut nécessairement conclure de ces effets que le fil conjonctif dérange l'aiguille par une force émanée de lui-même, laquelle est dirigée transversalement à la longueur du fil, révolutive autour de son axe, et toujours parallèle à la portion de son contour circulaire que l'aiguille regarde. Telle est aussi la conséquence que OErsted a tirée de ses premières observations.

Fig. 625.

Personnification du courant.

2157. Pour exprimer facilement ces rapports de position et de direction, qui se compliquent de mille manières, Ampère a imaginé une comparaison aussi ingénieuse que bizarre: il ne se contente pas de donner une direction au courant, il lui donne encore une tête, des pieds, une droite, une gauche; il le personnifie. Supposons, dans une portion quelconque du fil conjonctif, une petite figure d'homme, couchée dans le sens de la longueur, les pieds du côté du pôle zinc et la tête du côté du pôle cuivre, de telle manière que, d'après ce que nous avons dit précédemment, le courant entre par les pieds et sorte par la tête; concevons que cette figure ait toujours la face tournée vers le milieu de l'aiguille sur laquelle agit le courant; alors l'effet est tel que l'aiguille se trouve *disposée en croix*, et toujours son pôle austral vers la gauche de la petite image, ce qu'on exprime habituellement en disant que *l'aiguille se tourne en croix avec son pôle austral à gauche.*

§ II. *Loi de l'action d'un courant sur un aimant.*

La force directrice de l'aimant due à l'influence

Un des points les plus importants de l'histoire des phénomènes électro-magnétiques, c'est la détermination de la loi suivant laquelle la force émanée du fil conjonctif s'affaiblit à

diverses distances de son axe. Les recherches pour arriver à formuler cette loi ont été exécutées par MM. Biot et Savart. Voici comment les expériences ont été disposées : un fil conducteur rectiligne vertical de 3 mètres de longueur environ établit la communication entre les pôles d'une pile en activité. On donne au fil cette longueur, afin que les parties de ce conducteur recourbées vers le pôle soient assez éloignées pour que leur action puisse être négligée. On suspend ensuite un aimant prismatique très court à un fil de cocon au milieu d'une cage de verre. On rend ce barreau astatique, c'est-à-dire indifférent à l'action du globe, en plaçant à une certaine distance et dans une position convenable un fort barreau aimanté horizontal. On dispose l'aimant mobile près du courant, à une distance que l'on peut faire varier en éloignant plus ou moins le conducteur; l'aimant mobile s'arrête alors dans une direction perpendiculaire à la plus grande distance du centre de cet aimant au conducteur. On l'écarte de cette position en approchant un morceau de fer doux, qu'on rejette aussitôt au loin. On compte alors le nombre des oscillations que l'aimant fait dans un temps donné ; lorsque leurs amplitudes sont convenablement diminuées pour qu'on puisse leur appliquer la loi du pendule. Si on répète la même expérience à des distances différentes ; si on compare les carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps, on arrive à la loi de MM. Biot et Savart, dont voici l'énoncé : *L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance.*

d'un courant varie en raison inverse de la simple distance. Conducteurs rectilignes. Fig. 626.

2158. Pour arriver à des résultats précis, il est une circonstance importante qu'il ne faut pas négliger, et qui a été prise en considération par MM. Biot et Savart. La pile ne peut conserver une énergie constante pendant tout le temps nécessaire à des expériences de cette nature ; il faut employer un moyen de correction, qui consiste toujours à intercaller entre deux observations quelconques faites à des distances différentes, une observation faite à une distance normale, et à comparer chaque nouvelle observation à la moyenne des deux résultats obtenus à la distance normale avant et après cette observation.

Moyen de corriger l'erreur dépendant de l'inégalité d'action de la pile.

2159. Si, au lieu d'employer un fil conducteur rectiligne, on lui substitue un autre conducteur plié angulaire-

Conducteurs pliés angulairement. Fig. 627. ment; si on place le centre de l'aimant dans son plan, en dehors et sur la ligne horizontale qui partage l'angle en deux parties égales, on reconnaît, comme l'a vu M. Biot, que la force directrice due au courant varie encore *en raison inverse de la distance* de l'aimant au sommet de l'angle, et en outre proportionnellement à la tangente de la moitié de l'inclinaison du courant à l'horizon.

D'après la disposition de l'appareil de MM. Biot et Savart, le courant est d'une longueur que l'on peut regarder comme indéfinie, par rapport à la longueur de l'aiguille, et surtout par rapport à sa distance. C'est sous ces conditions que les lois sont démontrées par l'expérience.

2160. Laplace, vérifiant ces résultats par le calcul, a trouvé que l'action exercée par un élément linéaire d'un courant voltaïque sur une particule magnétique, varie en raison inverse des carrés de la distance et proportionnellement au sinus de l'angle que fait, avec la direction du courant, la ligne qui joint les centres de l'élément et de la particule. En calculant d'après ce principe la somme de toutes les actions élémentaires qui sont exercées sur une très petite aiguille par un courant voltaïque rectiligne et indéfini, on trouve que l'intensité de cette résultante totale doit diminuer en raison inverse de la simple distance, comme l'expérience le démontre.

§ III. *Rotation d'un courant autour d'un aimant. — Rotation d'un aimant par l'action d'un courant.*

Rotation d'un courant par l'influence d'un aimant. Fig. 628. 2161. M. Faraday exécuta en 1821 une expérience remarquable dont Wollaston avait eu l'idée. Il fit produire un mouvement de rotation continu par l'action mutuelle des aimants et des courants voltaïques. Voici à peu près les dispositions de cette expérience. — Un plateau circulaire de zinc zz, bordé par une couronne xx est percé vers son centre d'une ouverture pareillement bordée d'une couronne cylindrique yy. Ce dernier bord supporte une tige de cuivre cc', terminée par une petite cuvette c', dans laquelle on verse une goutte de mercure. De l'acide sulfurique étendu d'eau est versé sur le plateau de zinc, entre les deux cylindres xx, yy. Enfin, une pointe métallique p appuyée sur le fond de la cu-

vette c', supporte un petit équipage composé de deux fils de cuivre verticaux tt, $t't'$, soudés vers le bas à un anneau de cuivre ss, qu'ils maintiennent au milieu du liquide acide. L'action de l'acide sur le zinc donne lieu à une décomposition du fluide naturel; l'électricité positive se porte sur l'acide, se transmet par l'anneau de cuivre ss aux fils verticaux tt, $t't$, et par la pointe p et le mercure de la cuvette c', à la tige $c'c$ pour aller rejoindre l'électricité négative qui tend à s'accumuler sur le plateau de zinc. Il en résulte donc un courant voltaïque, ascendant dans les deux branches verticales tt, $t't'$. Dans ces circonstances, si l'on présente le pôle d'un aimant dans l'intérieur du cylindre yy, on voit l'équipage prendre un mouvement de rotation continu autour de la verticale cc'. Si l'on retourne l'aimant en présentant son autre pôle, on remarque immédiatement un mouvement de rotation en sens contraire.

2162. L'expérience inverse de celle de Faraday, c'est-à-dire la rotation d'un aimant sous l'influence d'un courant fixe a été exécutée par Ampère. Voici l'appareil qu'on emploie pour cette expérience : on prend un large tube en verre rempli de mercure, on y fait flotter un barreau aimanté cylindrique qu'on maintient vertical avec un contrepoids en platine. L'aimant présente à sa base supérieure une cavité dans laquelle on verse un peu de mercure, et dans laquelle on fait arriver la pointe d'un conducteur vertical communiquant avec un des pôles d'une pile; un cercle en cuivre qui plonge dans le mercure du tube communique par l'intermédiaire d'un conducteur avec l'autre pôle de la pile. Ceci étant ainsi disposé, il en résulte un courant qui passe du cercle de cuivre au mercure contenu dans le tube, à l'aimant, au mercure contenu dans la cavité de l'aimant et au fil qui y plonge. L'aimant est alors animé d'un mouvement autour de son axe. Ce mouvement de rotation change de sens lorsqu'on retourne l'aimant, en conservant la même direction au courant, ou en renversant le courant et laissant la même disposition à l'aimant.

Rotation d'un aimant par l'action d'un courant.

Fig. 629.

2163. M. Faraday a trouvé le moyen de déterminer un autre genre de rotation que l'on peut produire avec l'appareil d'Ampère légèrement modifié. Voilà les détails de cette expérience : on prend une large éprouvette de verre vv';

Autre rotation d'un aimant sous l'influence d'un courant.

Fig. 630.

on la remplit de mercure jusqu'à une petite distance de ses bords; un barreau aimanté cylindrique *a b* lesté avec un contrepoids de platine *p* se tient debout dans le mercure de manière que son pôle *a* s'élève de quelques mètres au-dessus du niveau. Une tige *t*, que l'on élève ou que l'on abaisse à volonté par le moyen d'une vis de pression, vient plonger dans le mercure par son extrémité inférieure, tandis qu'elle communique, par son autre extrémité, avec un conducteur en cuivre *c* qui communique lui-même avec l'un des pôles de la pile; enfin le conducteur *c'*, qui tient à l'autre pôle, passe sur le bord de l'éprouvette et plonge dans le mercure très près de son contour extérieur. On lui donne la forme d'un anneau pour que tout soit symétrique; dès que la communication est établie, l'aimant tourne dans le même sens d'un mouvement plus ou moins rapide, et fait des révolutions successives autour de la tige *t*.

§ IV. *Aimantation par les courants.*

2163. Peu de temps après les découvertes d'Œrstedt, M. Arago fit l'observation que le fil conjonctif d'une pile agissait sur la limaille de fer de la même manière qu'un aimant, cette limaille y reste attachée dans toute son étendue, quelque long que soit le fil, tant que le courant voltaïque traverse le fil; mais quand la communication entre les deux pôles de la pile est interrompue, le fil perd cette propriété, la limaille tombe immédiatement à peu près en même temps. Davy fit la remarque que l'on peut aimanter des aiguilles d'acier en les plaçant perpendiculairement à la direction d'un courant voltaïque. Il ne faut qu'un temps très court pour produire cette aimantation, et en renversant la direction du courant, on trouve les aiguilles aimantées en sens contraire.

Observations de M. Arago. — *Expériences de Davy.*

2164. Ampère et Arago produisirent, sur un fil d'acier, au moyen d'un courant électrique, le même effet qu'on peut déterminer avec un aimant; voici comment l'expérience est disposée. On contourne un fil métallique en hélice autour d'un tube de verre; on place, suivant l'axe de ce tube une tige d'acier légèrement trempée qui occupe à peu près toute la longueur du tube; cette tige s'aimante

Expériences d'Ampère et d'Arago.

lorsqu'on fait passer un courant voltaïque à travers l'hélice; elle présente alors deux pôles, placés de la manière suivante: si on suppose l'observateur couché sur une spire de l'hélice et regardant le morceau d'acier, le pôle austral se forme à gauche du courant et le pôle boréal à droite.

Un seul instant suffit pour que l'aiguille soit aimantée; la rapidité avec laquelle le courant peut vaincre la résistance de la force coercitive, est un phénomène remarquable.

Hélice dextrorsum et sinostrum. Fig. 631. Fig. 632.

On distingue deux espèces d'hélices, l'hélice *dextrorsum* dans laquelle le fil s'enroule vers la droite (fig. 631), et l'hélice *sinostrum*, celle dans laquelle le fil s'enroule vers la gauche (fig. 632): en supposant qu'on les tienne de la même manière, l'inspection de la figure 632 montre que toutes les vis et le tire-bouchon sont des hélices *dextrorsum*; dans cette espèce d'hélice le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant, ou bien à l'extrémité positive du fil, et dans l'hélice *sinostrum*, au contraire, c'est le pôle austral de l'aiguille qui se trouve à l'extrémité positive.

Aimantation par la décharge d'une bouteille de Leyde. Fig. 633.

2165. On peut également produire ce phénomène d'aimantation en faisant passer la décharge d'une bouteille de Leyde à travers le fil plié en hélice, et on possède un moyen intéressant de produire à volonté des points conséquents (fig. 633); si le fil métallique qui entoure le tube après avoir formé une hélice est ensuite contourné de manière à former une hélice contraire, puis une autre semblable à la première et ainsi de suite, l'influence du courant ou de la décharge électrique détermine dans la tige d'acier autant de *points conséquents* qu'il y a de changements d'hélice. M. Savary, qui s'est occupé de ce mode d'aimantation, a ainsi signalé plusieurs faits importants.

Expériences de M. Savary.

2166. Il plaça plusieurs petites aiguilles d'acier à des distances différentes du conducteur rectiligne, à travers lequel il fit passer la décharge d'une bouteille de Leyde; il remarqua alors que ces aiguilles toutes placées perpendiculairement à la direction du courant, n'étaient pas aimantées de la même manière. Le magnétisme développé était de plus en plus faible dans les aiguilles placées plus loin, et, chose remarquable à une certaine distance, les aiguilles avaient acquis des pôles contraires à ceux manifestés par des aiguilles

plus voisines du conducteur, aux extrémités tournées dans le même sens; en essayant l'état magnétique des aiguilles plus éloignées, il parvint à reconnaître jusqu'à cinq alternatives semblables à la précédente.

On peut obtenir, comme l'a également démontré M. Savary, une disposition inverse dans les pôles d'une aiguille aimantée par un courant en hélice, en se servant d'une hélice très longue et une aiguille qui n'occupe qu'une portion de l'axe du tube; si on interpose entre l'aiguille et le tube des corps même non magnétisables, au moment de la décharge, on obtient des résultats très différents; si par exemple on entoure l'aiguille d'une enveloppe de cuivre, elle reste à l'état naturel. En comparant ces faits on ne peut s'empêcher d'apercevoir une remarquable analogie entre la transmission de la propriété magnétique et celle du son et de la lumière, et attribuer tous ces phénomènes à des mouvements vibratoires qui se propagent dans des fluides.

Action par influence d'un courant voltaïque sur le fer doux.

2167. En traitant des aimants, nous avons vu qu'une masse de fer doux acquérait des propriétés magnétiques, lorsqu'elle était sous l'influence d'un aimant, il était alors naturel de penser que, puisqu'un courant voltaïque possède la propriété d'aimanter des aiguilles d'acier malgré leur force coercitive, ce même courant doit également agir par influence sur du fer doux. Voici comme on dispose l'expérience. On prend un morceau de fer doux ayant la forme d'un aimant à fer à cheval, on forme autour de lui un grand nombre de spires avec un fil métallique recouvert de soie et traversé par un courant voltaïque; le fer doux peut supporter alors une armature et des poids considérables tant que le fil qui l'entoure est traversé par le courant. On comprend que le développement du magnétisme n'étant limité que par l'énergie du courant voltaïque qui le détermine, le fer doux peut supporter des charges beaucoup plus fortes que celles que pourrait soutenir un aimant artificiel des mêmes dimensions.

Aimantation de fer doux sous l'influence d'un courant voltaïque employé comme moteur.

2168. On a essayé de construire plusieurs machines électro-magnétiques en employant comme moyen moteur l'aimantation du fer doux sous l'influence d'un circuit voltaïque : nous allons indiquer, d'après M. Lamé, les essais remarquables tentés à cet égard par M. Jacobi. Voici le

principe de cette machine : des barreaux cylindriques de fer doux sont disposés à des distances égales sur le pourtour d'un disque, et normalement à son plan. Deux disques armés de la même manière sont assujettis en regard sur le même axe, de telle sorte que, l'un étant fixe et l'autre mobile, les barreaux de ce dernier viennent presque toucher ceux du premier. Un même fil de cuivre entouré de soie, conduisant le courant d'une très forte pile, forme autour de tous les barreaux des hélices disposées de telle sorte, que les extrémités libres des barreaux d'un même disque soient alternativement des pôles de noms contraires. D'après cette disposition, quand les barreaux occupent les milieux des intervalles qui séparent les barreaux fixes, les attractions et les répulsions mutuelles de tous ces aimants font tourner le disque. Un commutateur particulier renverse le sens du courant autour des barreaux mobiles, à chaque passage vis-à-vis des barreaux fixes, et les actions magnétiques changent alors de signes, la rotation continue. Une chaloupe, munie de roues à palettes que cette machine faisait mouvoir, a navigué sur la Neva pendant plusieurs heures, contre le courant et par un vent violent. La force de la machine a été estimée aux 3/4 de celle d'un cheval. La pile était composée de 64 couples zinc et platine, offrant une surface totale de 20 mètres, 80 centimètres carrés, et alimentée par de l'acide sulfurique étendu ; sa puissance était telle, qu'un fil de platine long de 2 mètres, et de la grosseur d'une corde de piano, introduit dans le circuit, fut rougi immédiatement.

Quand on considère qu'un courant si énergique et déterminé par des moyens dispendieux n'a produit qu'un si faible résultat, on doit concevoir peu d'espérance sur ce nouveau moteur ; cependant si on réfléchit qu'une idée nouvelle peut surgir, qui peut donner un moyen plus facile de produire des courants puissants et permanents ; on ne doit pas trop se hâter de rejeter trop loin une nouvelle et remarquable application de la science à l'industrie.

2169. M. Boisgiraud a observé dès les premiers temps de la découverte d'OErsted des phénomènes curieux d'attraction et de répulsion d'un aimant sous l'influence d'un courant. On suspend verticalement à un fil une aiguille à

Attraction et répulsion d'un aimant par un courant.

coudre, elle est tantôt attirée tantôt repoussée par un courant rectiligne horizontal voisin, suivant la direction de ce courant relativement aux pôles de l'aiguille. Si le conducteur est situé entre les deux plans horizontaux menés par les pôles, il y a toujours attraction ou toujours répulsion, que le pôle austral soit à la gauche ou à la droite du courant. Si le conducteur est sucessivement élevé au-dessus des deux plans horizontaux menés par les pôles, ou abaissé en-dessous, l'attraction ou la répulsion persiste encore jusqu'à une certaine limite de distance, passé laquelle il y a répulsion ou attraction.

§ V. *Des multiplicateurs, galvanomètres, ou rhéomètres.*

Définition. 2170. On donne le nom de *multiplicateurs* ou de *galvanomètres*, à des instruments destinés à mesurer l'intensité des courants électriques. On a substitué aux noms précédents celui de *rhéomètres* qui est plus convenable et qui signifie mesure des courants : ce fut Schweiger qui inventa le premier multiplicateur électrique; à l'aide de cet appareil ingénieux on rend sensible l'action de très faibles courants sur l'aiguille aimantée, ce qui permet d'étudier la question du dégagement de l'électricité dans plusieurs circonstances où il eût été impossible de le faire auparavant.

Construction du galvanomètre. La construction des galvanomètres repose sur la propriété dont jouit le fluide électrique, quand il parcourt un fil de métal, de réagir sur une aiguille aimantée, librement suspendue, de telle manière que si le fil, se trouvant dans le plan du méridien magnétique, est placé au-dessus ou au-dessous de l'aiguille, celle-ci est déviée à droite ou à gauche, dans une direction perpendiculaire au fil suivant le sens du courant. Si donc on plie le fil de manière à le faire revenir au-dessus de l'aiguille, elle éprouve de chacune des circonvolutions une action qui tend à la diriger dans le même sens, de sorte que l'impulsion reçue est double de celle qui aurait été produite par le fil rectiligne. En continuant ainsi à replier le fil sur lui-même on multiplie l'action du courant sur l'aiguille; de là le nom de *multiplicateur électrique* donné à cet appareil, le fil qui est entouré de soie pour éviter la communication directe d'une circonvolution à l'autre est

enroulé autour d'un châssis en bois dans l'intérieur duquel est suspendue une aiguille aimantée. La construction de cet appareil varie suivant la source qui produit les courants que l'on veut observer : tantôt le multiplicateur est à fil très long et à petit diamètre, tantôt il est à fil court et d'un diamètre d'un millimètre à un demi-millimètre.

2171. Quand l'aiguille aimantée est dérangée de sa position d'équilibre par l'action d'un courant, elle tend à y revenir par suite de l'action de la terre. Pour détruire cette influence, Nobili eut l'heureuse idée de substituer à l'aiguille aimantée deux autres aiguilles aimantées, aussi identiques que possible, sous le rapport de la nature de l'acier, de leur construction et de leur aimantation, et que l'on fixe dans une direction parallèle, les pôles inverses en regard, aux deux extrémités d'une paille ou d'une autre tige légère : l'une des aiguilles est placée dans l'intérieur du châssis et l'autre en dehors. Ce système étant suspendu à un fil de cocon par un des bouts de la tige, n'obéit que faiblement à l'action du magnétisme terrestre, qui n'exercerait dessus aucune influence, si l'identité des deux aiguilles était parfaite ; mais comme cette condition ne peut être remplie, il ne lui reste plus qu'une force directrice très faible. Perfectionnement de M. Nobili.

Dans le multiplicateur à fil long, le fil de cuivre a moins d'un sixième de millimètre de diamètre et forme huit cents tours autour du châssis; dans le multiplicateur thermo-électrique, ou à fil court, le fil de cuivre recouvert de soie a 2/3 de millimètre de diamètre ; il forme 30 tours autour du galvanomètre. Les aiguilles aimantées sont des aiguilles ordinaires à coudre, de 36 à 46 millimètres de longueur et aimantées à saturation.

Le fil du multiplicateur est revêtu d'un fil de soie, dont les tours sont très serrés, on l'enroule sur un cadre en bois à peu près comme du fil sur une bobine; seulement on laisse libres 1 ou 2 mètres de longueur à chaque extrémité, c'est ce qu'on nomme les deux fils du multiplicateur ; le courant doit entrer par l'un et sortir par l'autre. La figure 634 représente le cadre sur lequel le fil est enroulé et la figure 635 représente un galvanomètre complet recouvert d'une cloche qui le garantit des agitations de l'air. Fil du galvanomètre. Fig. 634. Fig. 635.

Les applications du galvanomètre sont très nombreuses et

très importantes. Pour donner dès à présent une idée de sa sensibilité, nous dirons que si l'on plonge les extrémités des fils dans de l'eau faiblement acidulée, on voit aussitôt les aiguilles agitées d'un mouvement plus ou moins intense.

Galvanomètre différentiel.

2172. On a besoin dans quelques expériences d'un instrument qui indique non pas l'intensité du courant électrique, mais la différence d'intensité de deux courants; on donne à cet appareil le nom de galvanomètre différentiel. Il se compose de deux fils parfaitement égaux pour leur longueur, leur diamètre et leur conductibilité; ces deux fils sont enroulés simultanément sur le cadre, et lorsqu'on fait passer par chacun d'eux des courants opposés, on n'observe sur les aiguilles que la différence de leurs actions. Si les courants sont parfaitement restés égaux, l'instrument reste au zéro.

Galvanomètre de Colladon.

2173. On ne peut employer le galvanomètre ordinaire pour observer les déviations de l'aiguille aimantée, provenant des courants produits par la décharge de la bouteille de Leyde ou de l'électricité des nuages, car les circonvolutions du fil n'étant pas séparées les unes des autres par une substance suffisamment isolante, l'électricité passe de l'une à l'autre. M. Colladon, pour parer à cet inconvénient, prépara un galvanomètre de 500 tours avec un fil doublement recouvert de soie et dans lequel chaque série de tours est séparée par un taffetas gommé. En fixant l'un des bouts de fil de ce multiplicateur au conducteur positif d'une machine de Nairne et l'autre au conducteur négatif, la déviation est régulière et proportionnelle à la vitesse avec laquelle on tourne la manivelle.

Galvanomètre de M. Person.

2174. Une aiguille d'acier placée suivant l'axe d'une spirale électro-magnétique, devient magnétique lorsqu'on fait passer dans le fil la décharge d'une bouteille de Leyde faiblement chargée. M. Person a imaginé un multiplicateur fondé sur ce principe : On prend une aiguille d'acier très mince et d'une trempe très douce, et ne possédant qu'une polarité magnétique excessivement faible pour qu'elle puisse la perdre et en prendre une autre sans difficulté; on la suspend à un fil simple de soie, dans l'intérieur du châssis du multiplicateur, placé de manière que les circonvolutions du fil se trouvent perpendiculaires à la direction de l'aiguille, au

lieu d'être parallèles comme dans les multiplicateurs ordinaires. Quand on fait passer la décharge électrique dans le fil, l'aiguille suivant le sens de la décharge, prend une plus forte polarité, ou bien perd la sienne pour en reprendre une autre en sens inverse; dans le premier cas, elle reste immobile; dans le second, elle pirouette et décrit une demi-circonférence de cercle, afin de prendre une position d'équilibre compatible avec le changement de ses pôles. On doit donc opérer de manière à faire passer la décharge dans un sens tel que la polarité de la petite aiguille soit changée.

En disposant convenablement cet appareil on peut, d'après M. Becquerel, l'employer avec beaucoup d'avantage pour reconnaître des courants produits par de faibles décharges électriques.

CHAPITRE III.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-DYNAMIQUES.

---

§ I. *Action de la terre et des aimants sur les conducteurs mobiles.*

2175. Immédiatement après la découverte d'OErsted, Ampère commença une suite de recherches expérimentales et théoriques, qui ont servi à jeter les bases de l'électro-dynamique. Dès qu'on eut découvert l'action des courants sur les aimants librement suspendus, on pouvait naturellement conclure que si l'on rendait mobiles les conducteurs parcourus par l'électricité, en maintenant les aimants dans une position fixe, ces conducteurs prendraient une nouvelle position d'équilibre, dépendante de la position des aimants. Pour arriver à ce but, Ampère imagina un mode ingénieux de suspension qu'il appliqua à tous les courants mobiles. La terre agissant comme un aimant sur tous les corps doués de magnétisme, doit exercer sur les courants la même influence; il faut donc déterminer cette influence si l'on veut

Expériences d'Ampère.

séparer l'action de la terre de celle des courants dont on veut apprécier l'effet.

Action de la terre sur un conducteur mobile. Fig. 636.

2176. Voici le procédé le plus simple pour reconnaître l'action du magnétisme terrestre sur un courant mobile : soit ABCD une pièce rectangulaire en bois, sur laquelle on pratique deux petites rainures *ab*, *cd*, d'un demi-pouce de profondeur, que l'on remplit de mercure. OM est un long fil de soie fixé par son extrémité inférieure, et à l'autre extrémité duquel est attaché un fil de cuivre recourbé KMN ; les points K et N plongent légèrement dans le mercure. Aussitôt que l'on met en communication cet appareil avec une pile, en plongeant les deux fils extrêmes dans les coupes *vv'*, qui sont en relation avec le mercure des rainures, la partie mobile KMN du circuit se jette du côté de AB ou de CD, suivant le sens du courant ; en changeant la direction, le fil est chassé de l'autre côté. Cette action ne peut être attribuée qu'à l'influence du magnétisme terrestre, car le même effet est obtenu d'une manière plus marquée en plaçant sous la tablette un fort aimant dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, le pôle boréal de l'aimant dirigé en bas.

Appareil électro-dynamique d'Ampère.

2177. Ampère, dans ses nombreuses recherches, a beaucoup varié la construction des appareils électro-dynamiques. Voici, d'après M. Becquerel, la dernière disposition qu'il a adoptée, et qui permet d'observer, non seulement l'action du globe sur les courants, mais encore celle des courants sur les courants. Le bois bien sec offrant une résistance suffisante au passage de l'électricité voltaïque à faible tension, des conducteurs métalliques peuvent être disposés sur une table de bois sans que le courant se détourne de la route qu'ils lui assignent. Ampère a profité de cette propriété isolante du bois pour faire passer le courant provenant de la même pile par des conducteurs fixes et mobiles, dont il voulait constater l'action mutuelle. La table TT, sur laquelle est monté l'appareil, porte deux colonnes en cuivre VV' (fig. 637), leurs extrémités supérieures sont recourbées à angle droit, et aboutissent à deux petites coupes *xx'*, dont les centres se trouvent sur la même verticale. Les branches horizontales de ces colonnes sont séparées l'une de l'autre par de la gomme laque ou autre substance isolante. Si l'on met en communication le pied de chaque colonne avec

Fig. 637.

l'un des pôles d'une pile, il n'y aura courant qu'autant que les deux coupes communiqueront métalliquement entre elles. Pour remplir cette condition, Ampère emploie un fil de cuivre plié en rectangle (fig. 638) dont les extrémités sont terminées par des pointes d'acier; l'une de ces pointes repose sur une lame de verre légèrement évidée, placée au fond de l'une des capsules, qui est remplie de mercure, et l'autre plonge seulement dans la seconde, où se trouve aussi du mercure. Le circuit ainsi suspendu, a une mobilité suffisante pour obvier à l'action du magnétisme terrestre; lorsque la communication est établie avec la pile, il tourne, oscille, et se met dans la position perpendiculaire au plan du méridien magnétique pour y revenir, si on l'en écarte. En changeant la direction du courant, le circuit se retourne pour se replacer dans le même plan. Nous allons indiquer actuellement comment on établit la communication de l'appareil avec la pile, c'était la difficulté la plus sérieuse à vaincre. A cet effet, Ampère a imaginé une disposition très ingénieuse, qui permet de supprimer ou de renverser à volonté le courant, par un changement facile à exécuter (fig. 639). On pratique dans la table T T' deux rainures R R', de quelques lignes de profondeur, et quatre cavités semblables $v\,v'$ $t\,t'$, communiquant diagonalement par des lames de cuivre $l\,l'$ $m\,m'$, qui sont séparées au point de croisement par une substance isolante. Ces cavités et les deux rainures, après avoir été mastiquées pour que le bois humide ne puisse pas donner issue à une partie des courants, sont remplies de mercure. Maintenant, si l'on plonge le fil positif de la pile dans la rainure R, et le fil négatif dans la rainure R', le courant n'aura pas lieu tant que l'on n'établira pas une communication métallique entre chacune des deux rainures et l'une des cavités. L'inspection seule de la figure indique les deux combinaisons que l'on puisse faire à cet égard. Soient $b\,b'$ deux lames de platine, destinées à transmettre le courant dans l'appareil électro-dynamique; la lame b peut devenir positive ou négative, suivant que la cavité R communique avec t, et R' avec t, ou bien quand R communique avec v, et R' avec v'. Dans le premier cas, le courant suit la direction R t, $b\,b'$, t' R'; dans le second, il va de R en v, puis traverse la lame ll', et ensuite va de l' en $b\,t$ et de v' en R. Or, rien n'est plus simple que

Fig. 638.

Fig. 639.

d'établir ou d'interrompre successivement toutes ces communications, au moyen d'une bascule BB' en bois, qui peut tourner autour d'un axe aa', s'ajustant dans des trous aa'; on adapte sur cette bascule quatre arcs conducteurs en métal bb', dd'; en l'élevant ou en l'abaissant convenablement, on change les communications; quand les arcs b et b' sont abaissés, R et v communiquent par l'intermédiaire de rbc, et R avec v', au moyen de $r'b'c'$. Quand les arcs d et d' sont, au contraire, abaissés, la communication est établie entre R et t, et R' et t' par l'intermédiaire des arcs.

Au moyen de cette adjonction, l'appareil (fig. 637) se trouve constitué de manière à pouvoir fonctionner dans une foule de cas. Dès l'instant que l'on met en communication R et r' avec les pôles d'une pile, le courant monte par la colonne

Fig. 640. V, traverse le circuit (figure circulaire) (fig. 640), et redescend par l'autre colonne. Le circuit, après quelques oscillations, se met dans une position perpendiculaire au plan du méridien magnétique. L'équilibre stable a lieu quand dans la partie inférieure du circuit le courant va de l'est à l'ouest.

Fig. 638. Des circuits fermés triangulaires, carrés, ou d'une forme quelconque, peuvent être mis en expérience sur le même appareil (fig. 637), et présentent les mêmes effets.

Pour que l'action de la terre se neutralise par elle-même, il suffit d'ajuster les fils pour avoir de part et d'autre

Fig. 641. de l'axe de rotation des parties symétriques que le courant traverse dans le même sens. On a ainsi un système astatique.

Direction des courants verticaux par l'influence de la terre. Fig. 642.

2178. Voici la description de l'appareil qui a servi à M. Pouillet pour se rendre compte de l'action de la terre sur les courants verticaux. Il se compose de deux vases cylindriques de cuivre; l'un supérieur et l'autre inférieur d'un diamètre un peu plus grand (fig. 642). Ces vases sont percés en leur milieu d'une ouverture un peu large, pareillement cylindrique, dans laquelle passe la tige t, qui se termine par la coupe c; la traverse hh' est de substance non conductrice; elle porte en son milieu une pointe par laquelle elle repose en équilibre sur le fond de la coupe c, remplie de mercure. Les fils v et v' attachés à la traverse sont recourbés pour plonger par une extrémité dans l'eau acidulée du vase inférieur; une petite languette en métal, soudée sur le fond

du premier vase, plonge dans le mercure de la coupe, pour établir une communication entre l'eau et la tige. Ainsi, le courant qui entre par le vase inférieur passe dans l'eau acidulée du vase inférieur, dans les fils verticaux, dans l'eau acidulée du vase supérieur, dans la languette, dans la coupe, et vient enfin descendre par la tige *t*. Lorsqu'on relève l'extrémité inférieure ou supérieure de l'un des fils pour le faire sortir de l'eau acidulée, de manière que le courant passe seulement par l'autre fil, le système se dirige et vient se placer dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique; quand le courant est ascendant, le fil qu'il traverse se place à l'occident, ou du moins, s'il vient à l'orient, il n'y trouve qu'une position d'équilibre instable, dont la moindre force peut le déranger; c'est le contraire quand le courant est descendant.

Si les deux fils pris ensemble sont égaux et diamétralement opposés; s'ils sont placés à la même distance de l'arc, et traversés par des courants de même intensité, ils forment un *système astatique*, c'est-à-dire indifférent à l'action de la terre; mais il n'en est plus de même si les deux fils ne sont pas diamétralement opposés, ou s'ils diffèrent par quelques conditions de diamètre, de forme, de longueur, etc.

2179. Pour étudier l'action des courants horizontaux, on emploie, d'après M. Pouillet, un simple vase de cuivre analogue aux précédents; le fil horizontal terminé par des boules est en équilibre stable sur sa pointe, qui repose dans la coupe centrale; deux appendices verticaux très courts plongent dans l'eau acidulée du vase. Le courant qui entre, par exemple, par la coupe, traverse en sens opposé les deux moitiés du fil pour passer dans l'eau acidulée, et de là dans le métal du vase, et l'on aperçoit aussitôt un mouvement de rotation continu. La rotation se fait de l'est à l'ouest par le nord, quand le courant va du centre à la circonférence, et en sens contraire quand le courant va de la circonférence au centre du fil.

Rotation des courants horizontaux par l'influence de la terre. Fig. 643.

2180. L'action des aimants sur les conducteurs mobiles est parfaitement analogue à l'action de la terre sur ces mêmes conducteurs; mais dans toutes ces expériences il faudra employer des appareils astatiques. On peut suspendre le rectangle de la fig. 641 dans l'appareil de la fig. 637. On

Action des aimants sur les conducteurs mobiles. Fig. 641. Fig. 637.

voit qu'il reste en équilibre dans toutes les positions, et en approchant un des pôles d'un aimant, on l'attire ou on le repousse, on lui imprime les mouvements les plus divers.

§ II. *Action des courants sur les courants.*

Historique. 2183. C'est aux recherches d'Ampère que l'on doit les connaissances importantes de l'action des courants sur les courants, et les belles conséquences théoriques qui en résultent. Nous allons, à l'exemple de M. Pouillet, distinguer dans l'action des courants trois cas principaux : 1° courants parallèles, 2° courants sinueux, 3° courants croisés.

Action des courants parallèles. 2184. Deux courants parallèles en présence exercent l'un sur l'autre une action plus ou moins vive, et cette action dépeud de leur distance, de leur longueur et de leur intensité. Si on ne considère cette action que par rapport à la direction des effets, elle est soumise à cette loi générale très simple : *Deux courants parallèles s'attirent quand ils marchent dans le même sens, et ils se repoussent quand ils marchent en sens contraire.*

Fig. 644. Voici comme on démontre cette loi : soit, comme dans la figure 637, une tablette TT′ sur laquelle sont fixées deux colonnes verticales en cuivre V V′, réunies au moyen de deux tiges horizontales *th*, *th′*, également en cuivre, qui viennent s'adapter dans un petit cylindre d'ivoire *h h′* qui s'oppose à la libre circulation du fluide électrique d'une colonne dans l'autre ; deux petites coupes *m m′*, placées dans la verticale qui passe par le milieu de L L′ ; quatre autres coupes *d d′*, *g g′* placées deux à droite, deux à gauche. Un petit cylindre *m′ i′* en métal, qui porte la coupe *m′*, se divise en *i′* en deux branches terminées, l'une par la coupe supérieure *d′*, l'autre par la coupe inférieure *g′*. Un autre cylindre creux *m i*, portant la coupe *m*, est séparé de la première tige au moyen d'un tube de verre, et se divise également en deux branches qui correspondent aux coupes *d* et *g*. Deux petites lamelles *l l′* de cuivre flexibles qui communiquent avec les colonnes V V′, et peuvent plonger à volonté dans les coupes *m′* et *m*. Des bascules B B′ destinées à changer la direction des courants. Des bandes *b* et *b′* qui éta-

blissent la communication avec deux petites cavités $o\,o'$ remplies de mercure.

Les accessoires de cet appareil sont des pièces de diverses formes que le courant doit traverser. Veut-on démontrer que les courants parallèles qui vont dans le même sens s'attirent, et qu'ils se repoussent au contraire quand ils cheminent dans des sens différents, on suspend en équilibre dans les coupes $g\,g'$ le rectangle (fig. 645), sur lequel la terre n'a aucune action, et l'on pose le rectangle (fig. 646) sur la tablette T'T, les extrémités $z\,z'$ dans les cavités $o\,o'$. Quand la communication avec la pile est établie, le courant monte par la colonne V, se rend dans le rectangle suspendu en passant successivement par l, m' et la coupe g'; il se trouve ascendant dans les deux côtés latéraux extrêmes, et descendant dans les deux côtés du milieu. Il revient ainsi dans la coupe g; de là il passe en m et l', redescend par la colonne V' et arrive à la bascule B, entre dans la baude b, passe dans la cavité o et prend le côté vertical du rectangle fixe; puis, après avoir monté et traversé les différents circuits, il revient dans la cavité o', d'où il passe en b', puis en c, pour aller dans la bascule B', où il rejoint l'autre extrémité de la pile. Or, la branche verticale Z du rectangle fixe, et les branches latérales du rectangle mobile, qui sont traversées par des courants parallèles et ascendants, s'attirent plus ou moins fortement, quelle que soit la position primitive du rectangle mobile, comme l'indique la loi que nous avons précédemment énoncée.

Fig 645. Fig. 646.

Au moyen de ces mêmes appareils, on peut montrer alternativement l'action des courants parallèles qui cheminent dans le même sens, et l'action des courants parallèles qui cheminent en sens inverse; il suffit de tourner la bascule BB' sans rien changer à l'appareil, et on observe que les courants parallèles dirigés dans des sens différents se repoussent; ce qui complète la démonstration de la loi.

2185. L'action exercée par un conducteur sinueux, est la même que celle d'un conducteur rectiligne, terminés l'un et l'autre aux mêmes points et coïncidant dans leurs directions générales. Pour démontrer cette proposition, on emploie un conducteur formé de deux fils de cuivre garnis de soie servant, l'un à conduire le courant, l'autre à le rame-

Action des courants sinueux.

Fig. 647.

ner; avec cette différence néanmoins que l'un est droit et l'autre plié autour. Ce conducteur est placé d'une manière fixe sur la table T T' (fig. 644); les extrémités $z z'$ plongent dans les cavités $o o'$; puis, l'on suspend en équilibre dans les capsules $g g'$ le circuit astatique (fig. 641); on trouve que le premier n'exerce aucune action sur celui-ci, dans quelque position que ce soit. Cet effet n'a lieu qu'autant que l'intensité de l'action du conducteur sinueux est égale à l'intensité de l'action du conducteur rectiligne, puisque ces deux forces se font équilibre, qu'elles sont de signe contraire et que les deux conducteurs sont parcourus en sens contraire par le courant. Il en résulte que l'action d'un fil sinueux étant équivalente à l'action d'un fil droit, on peut remplacer par un procédé analogue à la composition des forces en statique, un courant curviligne d'une petite étendue, ou par sa corde ou par ses deux projections, faisant entre elles un angle quelconque.

Action des courants croisés.

2186. On nomme courants croisés ceux qui ne sont point parallèles, soit qu'ils se trouvent dans le même plan, et que leurs directions puissent se rencontrer, soit qu'ils se trouvent dans des plans différents et que leurs directions ne puissent pas se rencontrer : dans le premier cas le point de croisement est celui de rencontre; dans le second, c'est un des points de la plus courte distance des deux courants. Ampère a démontré que deux courants croisés tendent toujours à devenir parallèles pour marcher dans le même sens, ou bien : *Que deux courants s'attirent quand ils vont l'un et l'autre en s'approchant ou s'éloignant du sommet de l'angle, et se repoussent au contraire quand l'un s'éloigne et l'autre se rapproche du même sommet.* Pour arriver à la démonstra-

Fig. 644. Fig. 645. Fig. 646.

tion précédente, on place dans l'appareil (fig. 644) deux rectangles (fig. 645-646), l'un fixe et l'autre astatique et mobile. Le circuit mobile est suspendu dans les coupes $g g'$, par le moyen de deux pointes $y y'$, et le rectangle fixe, qui est formé d'un fil de cuivre, enroulé plusieurs fois sur lui-même afin d'avoir une action plus forte, est placé sur la tablette T T' comme dans l'expérience précédente. Dès l'instant que les deux rectangles sont parcourus par des courants, celui qui est mobile, lorsqu'on lui a donné une position quelconque, tourne autour de son axe et vient se placer dans une direction parallèle telle que les courants marchent dans

le même sens. Si donc les deux branches $a\ b$ et $c\ d$ forment un angle quelconque, et qu'elles soient parcourues par des courants cheminant en sens contraire; la branche $c\ d$ sera chassée, et si les courants sont dans le même sens, elle sera attirée.

2187. Les parties d'un même courant exercent les unes sur les autres une répulsion, cet effet résulte de ce que les deux portions contiguës d'un même courant rectiligne peuvent être considérées comme deux courants formant un angle à 180°, dont le sommet est au point de séparation. Or, comme le courant de l'une des portions va en s'approchant du sommet, et que le courant de l'autre va au contraire en s'éloignant, il doit y avoir répulsion. C'est ce que Ampère a démontré de la manière suivante : Soit A B C D (fig. 648) un vase en verre ou en porcelaine divisé en deux parties par une cloison A C également de verre, fixée sur ses bords avec du mastic, et rempli de mercure. On pose sur le mercure le conducteur $n\ p\ q\ r$ formé d'un fil de cuivre recouvert de soie, de manière que les deux branches $n\ p$ et $r\ q$ soient parallèles à la cloison; puis, dans deux capsules E et F situées dans le prolongement de ces mêmes branches et en communication avec le mercure des compartiments; on plonge les deux fils extrêmes d'une pile. Ce courant passe du mercure dans l'axe $n p\ q\ r$. Au même instant le conducteur s'éloigne parallèlement à lui-même jusqu'à l'extrémité du vase. Ce mouvement indique l'action répulsive qu'exercent les unes sur les autres les diverses parties d'un même courant.

Les portions contiguës d'un même courant rectiligne se repoussent.

Fig. 648.

2188. Nous avons parlé dans les paragraphes précédents des expériences de rotation d'un aimant sous l'influence d'un courant ou de rotation d'un courant sous l'influence d'un aimant. Nous allons traiter maintenant de la rotation d'un courant par l'action d'un courant, il suffit pour se rendre compte de ce phénomène, de se rappeler les principes que nous avons exposés; soit un courant fixe indéfini A B, et un courant C D mobile parallèlement à lui-même : le point d'intersection étant en R, il y aura attraction dans l'angle B R D entre les parties R B et C D, qui vont l'une et l'autre en s'éloignant du sommet de l'angle; il y aura au contraire répulsion dans l'angle A R D, parce que la partie A R s'approche, tandis que la partie C D s'éloigne : ces deux forces donnent naissance à une résultante pa-

Rotation d'un courant par l'action d'un courant.

Fig. 649.

rallèle A B qui tend à pousser le courant C D de A vers B, si le courant A B a la forme d'un cercle; il ressort évidemment de cette disposition que C D devra tourner indéfiniment en vertu de la même action; on démontre ce fait au moyen de l'appareil suivant, soit A R S B un ruban de cuivre couvert de soie plié en hélice, et adapté autour du vase de cuivre V, C I est un conducteur communiquant au pied de la colonne à coupe P qui porte le fil M et D, communique au vase V. Si l'on met le pôle positif de la pile en A et le pôle négatif en D, après avoir établi une communication de B en C, et rempli le vase V d'eau acidulée, on a un courant qui marche dans l'hélice de Z en S en faisant le tour du vase, et qui descend dans les branches verticales du fil, et celui-ci se met à tourner suivant Z I S: si, au contraire, on met le pôle positif de la pile en B, et le pôle négatif toujours en D, après avoir établi une communication de A en C, alors le courant marche dans l'hélice de S en Z en faisant le tour du vase, il est toujours descendant dans les branches verticale du fil qui tourne alors en sens contraire, c'est-à dire suivant S I Z. Le renversement démontre qu'on ne peut attribuer cette rotation à l'action de la terre, car le courant étant toujours descendant dans le fil, la terre le ferait toujours tourner dans la même direction.

Fig. 650.

§ III. *Théorie du magnétisme par Ampère — des solénoïdes.*

2189. Ampère en comparant les faits nombreux du magnétisme, de l'électro-magnétisme et de l'électro-dynamique, est parvenu à créer une théorie qui établit un lien naturel entre ces phénomènes auparavant disparates; elle montre l'identité qui existe sous certaines conditions entre les actions des aimants et celle des courants voltaïques en attribuant à ces actions une même origine. Avant d'exposer le sommaire de cette théorie nous allons rappeler l'action exercée par le globe sur les conducteurs mobiles.

De l'action du globe sur les courants mobiles.

Nous savons que l'action que la terre exerce sur les conducteurs mobiles intervient, dans toutes les expériences électro-dynamiques ou comme moteur principal, ou comme modifiant la position d'équilibre. Si on dispose un conducteur rectangulaire, de telle manière qu'il soit mobile autour

d'un axe horizontal, perpendiculaire au méridien magnétique, lorsqu'un semblable conducteur est traversé par un courant voltaïque, il tourne jusqu'à ce que son plan soit perpendiculaire à la direction de l'aiguille d'inclinaison; dans cette position d'équilibre le courant est dirigé de l'est à l'ouest, sur le côté inférieur du rectangle. Ainsi, la terre agit en chaque lieu sur un courant voltaïque, comme un aimant dont l'axe serait parallèle à l'aiguille d'inclinaison, ou comme des courants électriques tous dirigés de l'est à l'ouest, lesquels existeraient à la surface ou dans l'intérieur du globe dont l'intensité irait en croissant du pôle à l'équateur.

Ce fait montre que lorsqu'un aimant et un conducteur plan mobile autour d'un axe sont successivement soumis à la même influence électro-dynamique leurs positions d'équilibre ont entre elles cette relation, que le plan du conducteur se place perpendiculairement à la direction de l'axe de l'aimant auquel on le substitue. En partant de ce principe on peut prévoir les actions que le globe, les aimants ou les conducteurs fixes doivent exercer sur un fil conducteur, contourné en hélice autour d'un cylindre et ramené suivant l'axe, pour que cette dernière portion rectiligne détruise les composantes du courant hélicoïdal dirigées parallèlement à cet axe; en sorte qu'on puisse amener l'ensemble à une série de courants circulaires parallèles aux bases du cylindre. Chacun de ces courants circulaires tend à se placer soit perpendiculairement au méridien magnétique ou à l'axe d'un aimant, soit parallèlement au plan d'un conducteur fixe; il résulte de là que l'axe de l'hélice doit se placer comme le ferait une aiguille aimantée soumise aux mêmes influences.

On peut construire directement au lieu d'une hélice un appareil avec un fil métallique entouré sur toute sa longueur d'un cordon de soie, des circonférences de cercle *bcd*, *efg*, *hkl*, toutes égales entre elles, et dont les points soient perpendiculaires à l'axe du cylindre; les parties linéaires *ab*, *de*, *gh*, qui les réunissent sont toutes sur une même droite parallèle à l'axe; lorsque le nombre des cercles paraît suffisant, le fil est ramené suivant *np*, parallèlement à *la*, et aussi près que possible de cette dernière droite; par cette disposition le courant qui parcourt le fil total, se compose Fig. 651.

exactement de courants circulaires et de courants rectilignes opposés dont les actions le détruisent.

Solénoïdes ou cylindre électro-dynamique.

2190. Ampère a donné le nom de *solénoïde* ou de *cylindre* électro-dynamique à l'appareil précédent. Il désigne donc sous le nom de solénoïde un système de petits courants circulaires égaux, parcourus dans le même sens par un courant électrique dont les centres sont placés sur une courbe quelconque et les plans perpendiculaires à cette courbe.

L'expérience démontre qu'un solénoïde se conduit comme un aimant lorsqu'il est sous l'influence d'un courant électrique; soit un solénoïde rendu mobile autour d'un axe vertical et introduit dans le circuit voltaïque, il se place par la seule action du globe dans une position telle que son axe est exactement parallèle à l'aiguille de déclinaison, si elle est mobile autour d'un axe perpendiculaire au méridien.

Si on introduit dans le circuit voltaïque un autre solénoïde que l'on puisse tenir à la main, si l'on présente successivement ses deux extrémités à une même extrémité de l'hélice mobile, il y a attraction dans un cas et répulsion dans l'autre; on peut établir comme proposition générale qu'un solénoïde se comporte comme un aimant ayant le même axe et dont le pôle austral serait placé à la gauche du courant de telle manière que le courant chemine de ses pieds à sa tête et qui regarderait l'axe du cylindre.

Théorie du magnétisme.

2191. Ces remarquables analogies ont été établies par Ampère lorsqu'il a établi sa théorie sur la constitution des aimants. Dans cette hypothèse au lieu de supposer que le magnétisme est dû à la séparation des deux fluides, on l'attribue à des courants électriques qui se meuvent autour des particules. Ces courants existent dans tous les corps sensibles au magnétisme; dans un corps à l'état naturel les courants ont lieu dans toutes les directions autour d'une même particule; l'aimantation a pour effet de donner à tous ces courants des directions tendant au parallélisme et dont les actions concordantes sur les courants extérieurs expliquent les attractions et les répulsions magnétiques.

L'influence d'un courant énergique perpendiculaire à une aiguille d'acier peut produire l'aimantation par ses actions attractives et répulsives sur les courants électriques des particules, qui tendent à amener leurs plans parallèlement

au courant extérieur influent, ou perpendiculairement à l'axe de l'aiguille. Un barreau d'acier aimanté possède une force coercitive qui s'oppose à ce que les courants particulaires reprennent leurs anciennes directions lorsque le courant influent est écarté; mais dans le fer doux cette force coercitive n'existant pas, les courants reprennent leurs directions variées, après la cessation des actions extérieures, et le corps rentre dans l'état naturel. L'influence des aimants pour aimanter d'autres corps doit être exactement la même que celle des courants extérieurs. En admettant la théorie d'Ampère on est conduit naturellement à penser que le globe est traversé par des courants électriques ayant le rapport d'intensité et la direction que nous avons précédemment déterminées, et qui causent tous les phénomènes de magnétisme terrestre. Ces courants terrestres dirigent l'aiguille aimantée, occasionnent dans les minerais et les objets en fer, tous les phénomènes de l'aimantation qui paraissent spontanés. Les variations de la déclinaison et de l'inclinaison proviennent des changements périodiques de la température auxquels correspondent des différences d'intensités dans les courants terrestres; on voit comment l'ingénieuse hypothèse d'Ampère établit un lien naturel entre des phénomènes si remarquables de la nature et qui au premier abord paraissaient si différents.

CHAPITRE IV.

PHÉNOMÈNES THERMO-ÉLECTRIQUES.

§ I. *Courants dans les circuits d'un seul métal.*

2192. Outre les différentes sources d'électricité que nous avons passées en revue, il faut citer encore la chaleur, laquelle, quoique ne produisant que des courants d'une très grande force, en donne cependant d'une uniformité que l'on trouve difficilement dans les autres sources. Rappelons

d'abord les signes d'électricité que la chaleur développe sur des substances homogènes. Il y a, comme nous l'avons dit, certains cristaux naturels qui, lorsqu'on les chauffe, présentent ces phénomènes électriques. La tourmaline est très propre à démontrer ces propriétés (2092).

Les métaux également donnent des courants sensibles par la chaleur. La première condition pour que l'expérience réussisse, est que la chaleur soit inégalement distribuée. Introduisez un fil de platine dans un tube de verre, dont une extrémité soit fermée à la lampe; en faisant communiquer le bout libre du fil avec le plateau inférieur du condensateur de Bonhenberger : enroulez sur l'extrémité fermée du tube un autre fil de platine, dont le bout libre communiquera avec le sol; chauffez alors fortement le bout enroulé jusqu'à le faire rougir; le fil intérieur transmettra alors au condensateur une quantité sensible d'électricité positive. Comme le verre à une haute température est conducteur de l'électricité, il n'influe en rien sur les effets produits qu'on ne peut attribuer qu'à la chaleur, et à la distribution inégale de cette chaleur, laquelle chauffe plus le fil extérieur que celui qui est protégé par le verre; le bout dont la température est la plus élevée prend l'électricité positive, et l'autre l'électricité négative.

Causes des phénomènes thermo-électriques.

2193. Le pouvoir conducteur des métaux pour la chaleur, est une des causes qui influent sur la production des effets thermo-électriques; et si, dans l'intérieur de la masse d'un métal de la classe de ceux qui sont fortement thermo-électriques, il se trouve des corps étrangers qui modifient la conductibilité de ce métal pour la chaleur, les deux électricités se séparent là où ces corps sont placés. Ainsi les métaux facilement oxidables ne donnent des signes d'électricité que quand la surface chauffée se couvre d'une couche d'oxide. L'action chimique n'a cependant pas de part au développement de l'électricité; car M. Becquerel ayant privé le métal du contact de l'air en opérant dans de l'huile, eut encore des courants sensibles. L'or et l'argent, quand ils sont très purs, ne donnent pas de courants; mais quand ils ne le sont pas, quand ils contiennent un peu de cuivre, la chaleur développe à leur surface un peu d'oxide qui met obstacle à la propagation de la chaleur, et le courant a lieu.

§ I. *Courant dans les circuits de plusieurs métaux.*

2194. Examinons maintenant la production de l'électricité déterminée par la chaleur dans des circuits composés de deux ou plusieurs métaux. M. Seebeck, qui les a observés le premier, s'est servi d'un cylindre composé de bismuth, aux extrémités duquel est soudée une lame de cuivre en fer-à-cheval. Quand on chauffe une soudure de cet instrument avec une lampe à alcool, il se produit de suite un courant qui marche du bismuth au cuivre; c'est ce que l'on peut facilement constater en plaçant dans le circuit une aiguille aimantée librement suspendue sur son axe. Dans cette expérience, l'aiguille placée au milieu du circuit est d'autant plus déviée, que la différence des températures des deux soudures est plus grande. Quand au lieu chauffer par une soudure, on la refroidit avec de la glace, et que l'on laisse l'autre soudure à la température ordinaire, le courant a encore lieu, mais en sens inverse. Quand on chauffe au contraire également les deux soudures, n'importe à quelle température, pourvu qu'elles le soient bien uniformément, on ne voit aucun effet produit sur l'aiguille aimantée. Il y a bien deux courants produits aux deux soudures; mais comme ils vont chacun du bismuth au cuivre, ils se rencontrent, et comme ils sont de même force, parce qu'ils proviennent d'une source égale, l'effet que chacun isolé produirait sur l'aiguille est neutralisé. — Expériences de Seebeck.

2195. Où cette électricité maintenant prend-elle naissance? Ce n'est pas sur le cuivre; car si l'on chauffe une partie du circuit en cuivre, à n'importe quelle place, pourvu que l'on n'approche pas assez du point des soudures, on n'observe aucune déviation de l'aiguille; elle ne prend pas non plus naissance sur le bismuth, car en construisant le circuit de manière que le bismuth puisse être chauffé à une place, sans que l'on chauffe en même temps une des soudures, nul indice du courant ne se fait encore sentir. Elle prend donc naissance dans la soudure même, c'est-à-dire entre le bismuth et le cuivre. M. Becquerel a prouvé par une expérience très ingénieuse, que l'électricité développée n'est pas due au simple contact des deux métaux, mais bien déterminée par la chaleur, et par l'inégalité du mouvement — Théorie de l'expérience de Seebeck. — Expérience de M. Becquerel.

de cette chaleur à travers l'inégale conductibilité des métaux ou circuits. Il a disposé pour cela un circuit (fig. 652), dans lequel un élément fer et un autre cuivre sont d'abord en contact au point *a*, et pourtant ils sont séparés aux soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, par des fils de platine, d'or et d'étain. On observe l'intensité du courant qui se développe quand on porte la soudure *a* à la température de 50 degrés, et maintenant tous les autres à zéro; puis après on porte successivement à 50° les soudures *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, en maintenant également les autres à zéro. Dans ces diverses circonstances, les courants ont toujours la même intensité, de sorte que le fer et le cuivre, n'importe s'ils sont séparés par d'autres métaux, donnent naissance à un courant qui, si les différences de température sont bien observées, est toujours le même. Ce courant ne dépend par conséquent que de la température des deux extrémités, et ne peut pas dépendre du contact des deux métaux. Quelquefois quand la différence des températures n'est pas trop grande pour produire un courant plus énergique pour dévier l'aiguille aimantée, alors on emploie le système d'aiguilles compensées ou astatiques (2171). L'appareil ainsi construit, la plus petite différence de température, quand on touche seulement avec le doigt une des deux soudures, fait déjà dévier l'aiguille compensée.

Fig. 652.

Différences d'intensité du courant suivant la nature des métaux.

2196. Tous les métaux associés par couples de la même manière que le système précédemment décrit, et chauffés à une soudure, donnent lieu à des courants, mais ces courants n'ont pas la même intensité pour tous les métaux. Par différents essais, en construisant des circuits successivement par plusieurs métaux, et en observant de combien de degrés l'aiguille était déviée par chaque couple, en tenant une soudure à 100° et l'autre à zéro, on classa ces métaux en raison de leur tendance à prendre l'électricité positive ou négative. Ces résultats sont représentés dans le tableau suivant : dans lequel chaque métal est électro-positif par rapport à ceux qui le suivent, et négatif avec tous ceux qui le précèdent :

Table des pouvoirs thermo-électriques des métaux.

Antimoine, arsenic, fer, zinc, or, cuivre, laiton, rhodium, plomb, étain, argent, manganèse, cobalt, palladium, platine, nickel, mercure, bismuth.

§ III. *Pile thermo-électrique.*

2197. On peut obtenir des courants assez énergiques, en associant plusieurs couples métalliques ensemble; ainsi, en construisant un parallélogramme avec deux cylindres de cuivre et deux de bismuth en les faisant alterner ensemble. On a des résultats divers selon que l'on chauffe l'une ou l'autre des soudures; en chauffant, par exemple, les soudures *a* et *b*, et refroidissant les deux autres, il n'y aura pas de courant; en chauffant tous les quatre ensemble, il n'y en a pas non plus; mais si l'on chauffe les deux soudures opposées *a* et *c*, et que l'on refroidisse les soudures *b* et *c*, le courant sera double.

Couples thermo-électriques. Fig. 653.

On concevra maintenant facilement la possibilité de combiner un plus grand nombre de couples; et l'on a alors la pile termo-électrique. Un appareil ainsi composé et construit convenablement peut servir à dénoncer des différences de température extrêmement minimes.

Pile thermo-électrique.

2198. M. Nobili a imaginé un thermomètre thermo-électrique ainsi construit. Il unit ensemble un grand nombre d'éléments de deux métaux différents, soudés alternativement les uns aux autres; il replie alors le circuit de manière que toutes les soudures paires sont d'un côté, et les soudures impaires de l'autre, on forme aussi une masse à laquelle on donne la forme d'un cylindre. Il ne faut pas cependant que les différents couples se touchent; on les enveloppe pour cela avec un fil de soie, en laissant libres seulement les soudures, qui sont placées sur la base du cylindre. On enveloppe le tout avec un tube en cuivre, terminé d'un côté par un miroir parabolique; enfin le circuit est interrompu pour que l'on puisse former le circuit avec un multiplicateur. Quand on fait tomber sur le miroir parabolique des rayons de chaleur rayonnants extrêmement faibles, l'aiguille du galvanomètre est déviée.

Thermomètre thermo-électrique de Nobili.

2199. M. Melloni a perfectionné la pile thermo-électrique qui, maintenant, est le plus exact et le plus sensible des instruments pour étudier les lois de la chaleur rayonnante. L'appareil de M. Melloni se compose de cinquante petits barreaux de bismuth et d'antimoine, placés les uns à côté des autres, et formant un seul faisceau prismatique F F', dont

Appareil de Melloni. Fig. 654.

la longueur est de 30 millimètres, et la section de 96 centimètres carrés. Les barreaux d'antimoine qui se succèdent alternativement sont, comme dans l'appareil précédent, entourés d'une substance isolante dans leur longueur, et sont soudés alternativement à leurs extrémités. Les deux faces terminales sont noircies. Le premier et le dernier élément portent chacun un fil de cuivre qui vient aboutir à des chevilles c c' de même métal, passant à travers un morceau d'ivoire fixé sur l'anneau A A'. L'intervalle compris entre la surface intérieure de cet anneau, et les éléments de la pile est rempli d'une substance isolante. Les extrémités libres des deux fils sont mises en contact avec un multiplicateur, dont l'aiguille marchant sur un cadre divisé en degrés indique la différence de température entre les deux extrémités de la pile. Pour pouvoir placer l'axe de la pile sous diverses inclinaisons, on construit l'appareil sur une charnière convenablement placée, et pour que la chaleur rayonnante latérale ne puisse avoir aucune influence sur les faces, on entoure les deux extrémités des éléments qui débordent l'anneau, en adaptant sur l'anneau même deux tubes de cuivre brillants à l'extérieur, et noircis à l'intérieur.

Multiplicateur. Fig. 655. Le multiplicateur est ainsi construit : A B C est le châssis sur lequel le fil en cuivre est enroulé. Les deux bouts de ce fil aboutissent aux tubes métalliques F F'; ce châssis est fixé sur un plateau horizontal, tournant librement dans son plan et autour de son axe, au moyen d'une roue dentelée à pignon placée au-dessous, et mise en mouvement par le bouton; G H M N est le support du système astatique de deux aiguilles aimantées suspendues à un fil de cocon V L. R S est le cylindre de verre qui enveloppe l'appareil et repose sur la base. On donne aux aiguilles une longueur de 53 millimètres, et au fil de cuivre que l'on a soin de recouvrir doublement de soie un diamètre de $0^{mm}76$; on lui fait faire 150 circonvolutions autour du châssis. Le châssis a 6 millimètres de hauteur sur une longueur un peu plus grande que celle des aiguilles. Le cadran est percé à sa partie centrale d'une petite ouverture circulaire, et est coupé en deux par une fente assez étroite depuis le centre jusqu'au bord postérieur. Cette fente sert pour faire juger si le fil de suspension se trouve sur l'axe.

2200. On peut construire des piles thermo-électriques encore d'une autre manière, fondées sur la propriété que possèdent les courants thermo-électriques de ne pas passer dans l'eau pure. On peut les composer de tant d'éléments que l'on veut, ordinairement bismuth et cuivre, soudés ensemble comme dans la figure 656. La figure 657 représente une pile de huit éléments vue en dessus et en perspective. Des vases de terre remplis alternativement de glace et d'eau à 80° servent à maintenir les soudures paires à zéro, et les soudures impaires à 80°. On a disposé une petite aiguille suspendue à un fil de soie au-dessus du milieu d'un élément cuivre; elle sert à marquer par ses oscillations l'intensité du courant qui passe dans la pile. On peut démontrer par cet appareil, que l'intensité du courant est proportionnel au nombre des éléments qui sont mis en mouvement, c'est-à-dire que si l'on chauffe et si l'on refroidit alternativement tous les huit éléments de cette pile, et après que l'on ne chauffe et que l'on ne refroidit qu'un seul en laissant tous les autres à la température ordinaire, l'intensité du courant, dans le premier cas, est quatre fois plus forte que dans le second. Mais on démontre aussi que si l'on met tout en activité, l'intensité est toujours la même; ainsi une pile composée de trente-deux, de vingt-quatre, de huit, et l'on peut même dire de deux éléments, donne une même intensité, pourvu que la grandeur des plaques et les différences de température soient toujours les mêmes. Il en résulte que si l'on ne met en activité qu'une seule paire d'une pile de trente-deux éléments, l'intensité du courant n'est que la seizième partie de celui qui est produit par une seule paire.

Pile thermo-électrique de M. Pouillet.
Fig. 656.
Fig. 657.

§ IV. *Lois générales des courants thermo-électriques.*

2201. L'électricité développée par la chaleur dans les métaux, n'a pas une très grande tension, mais aussi c'est celle qui a le plus d'uniformité, c'est-à-dire qu'aussi long-temps que l'on maintient les deux soudures à des différences de température constantes, la quantité d'électricité qui passe dans le circuit est toujours la même. Les piles voltaïques ont beaucoup plus de force au commencement de leur action qu'après un certain temps;

l'eau acidulée se saturant de plus en plus de l'oxide métallique, son action nécessairement doit s'affaiblir à chaque instant, tandis que dans les piles thermo-électriques la force du courant est toujours la même. On s'est servi de cette stabilité pour étudier différentes lois générales de l'électricité. Nous allons en exposer quelques unes en prenant pour guide les travaux de M. Pouillet.

Intensité des courants dans les divers points d'un circuit.

2202. Un courant qui traverse un circuit a dans tous les points de ce circuit une même intensité. Si l'on construit un circuit dans lequel on fait entrer plusieurs métaux hétérogènes et de diverses dimensions, l'intensité du courant est toujours la même dans tous les points du circuit. Pour le démontrer on construit un circuit composé d'un cylindre en bismuth, aux deux extrémités duquel on soude un fil de cuivre d'un mètre de longueur; l'une des soudures est maintenue à zéro et l'autre à 100, puis on complète le circuit avec des fils de différents métaux et de diamètres différents. Soit le premier fil *a* cuivre, le second *e* fer, *c* un tube de verre contenant du mercure avec lequel les deux fils sont en contact; puis de l'or, de l'argent, du platine, du plomb, et le dernier le cuivre de l'appareil, etc. Il faut disposer les différents fils horizontalement sur une ligne perpendiculaire au méridien magnétique. Il faut encore avoir soin de mettre à chaque expérience l'aiguille exactement au-dessus du fil, et à égale distance de son axe, le courant mettant toujours l'aiguille en croix avec lui. Cette force, ajoutée à celle qu'exerce déjà le magnétisme terrestre, la fera osciller plus vite si on la dérange de sa position ; on trouve alors qu'elle fait dans tous les points du circuit le même nombre d'oscillations ; donc l'intensité du courant est toujours la même. On peut encore replier les fils sur eux-mêmes de manière que dans chacun il y ait un courant opposé ; on verra alors que ces fils ainsi neutralisés l'un par l'autre n'auront aucune action sur l'aiguille, par conséquent les courants contraires ont partout la même intensité.

Lois d'un circuit homogène.

Fig. 658.

2203. L'intensité du courant est en raison inverse de la longueur du circuit. Quand on conserve toujours la même source thermo-électrique comme auparavant, on trouve que plus on allonge le fil, son diamètre étant toujours le même, plus l'intensité du courant diminue. Pour le démontrer, on

prend deux cylindre pareils, coulés dans un même moule, disposés comme le représente la fig. 658; on soude à chaque extrémité du cylindre un mètre de fil de cuivre, parfaitement homogène dans toute sa longueur et recouvert de soie. Pour reconnaître ensuite que l'intensité des courants dans les deux circuits est identique, on fait passer leurs courants en sens inverse dans un galvanomètre différentiel, dont les fils sont aussi parfaitement égaux. Quand il n'exerce aucune action sur l'aiguille aimantée, les sources sont nécessairement égales, car les deux circuits se neutralisent complétement. Cela trouvé; on ajoute à l'un des appareils 8 mètres du même fil, toujours recouvert de soie, et à l'autre 98. La longueur du fil dans le premier circuit sera donc de 10 mètres, et celle du second, de 100 mètres, c'est-à-dire dix fois plus long. Si la proposition que nous avons énoncée est exacte, l'intensité du courant du premier circuit sera dix fois plus grande que dans le second; c'est ce qu'on peut facilement vérifier, car en faisant faire, par exemple, deux tours au premier fil autour du galvanomètre, il faudra en faire faire vingt au second pour que l'effet sur l'aiguille soit le même.

L'intensité du courant est en raison directe de la section du fil. On vérifie la vérité de cette proposition par le même procédé. On prend deux gros fils de cuivre, dont on fait faire à l'un quelques tours sur le cadre du multiplicateur, on tire l'autre fil en plusieurs autres qui ont la même longueur que le premier et dont la somme des sections est égale à la section du premier fil; en les enroulant maintenant en sens contraire sur le même cadre et leur faisant faire le même nombre de tours, on voit que l'action sur l'aiguille aimantée est nulle.

§ V. *Conductibilité des différents métaux.*

2204. Pour déterminer la conductibilité relative de différents métaux, on se sert encore de deux sources thermo-électriques égales et d'un galvanomètre différentiel très délicat. A cet effet, pour chacune des sources identiques le circuit se compose d'abord de deux fils de cuivre soudés au bismuth, qui sont enroulés en sens contraire

autour du cadre du multiplicateur; leurs bouts libres plongent dans deux cuvettes contenant du mercure, qui sont ensuite réunies par des fils métalliques de diverses natures. Si, par exemple, on prend deux fils de cuivre pour établir chaque communication, si ces deux fils sont d'une même longueur et de même section, les deux circuits étant alors identiques se neutralisent, ils n'ont aucune action sur l'aiguille, qui marque zéro; mais si l'on substitue alors un fil d'un autre métal à un fil de cuivre, on voit qu'il faut alors faire varier sa longueur pour que l'aiguille reste en repos. Ces différentes longueurs des fils comparées entre elles, donnent la conductibilité relative des deux métaux. Ainsi, si l'on a trouvé la longueur d'un fil dont on veut trouver la conductibilité comparée à celle du platine, il est facile de connaître cette conductibilité, car si les deux fils ont le même diamètre, leur conductibilité est proportionnelle à cette longueur, et s'ils ont la même longueur, elle est en raison inverse de leur section. On avait pris le platine comme unité de conductibilité, mais comme ce métal se rencontre rarement pur, M. Pouillet a fait rapporter toutes les conductibilités à celle du mercure distillé. Pour cela il emploie un tube de verre parfaitement cylindrique et dont il détermine les diamètres par des pesées. Au lieu du fil métallique, les extrémités de ce tube viennent s'engager dans deux vases en verre, le tout rempli de mercure, et l'expérience s'accomplit comme la précédente. Nous donnons ici la conductibilité des métaux obtenus par ce procédé par M. Pouillet.

Tableau de la conductibilité des métaux.

Noms des substances.	Diamètre du fil.	Longueurs soumises à l'expérience.			Conductibilité.
	mm.	mill.	mm.	mill.	
Palladium.	0,176	1900	1200	500	5791
Argent 963 de fin.	0,174	2000	1500	200	5152
Argent 900.	0,194	id.	id.	id.	4753
Argent 857.	0,178	1200	800	400	4221
Argent 747.	0,179	1200	600	»	3882
Or pur.	0,176	600	300	»	3975
Or 951.	0,176	600	300	»	1338

Noms des substances.	Diamètre du fil.	Longueurs soumises à l'expérience.			Conductibilité.
	mm.	mill.	mm.		mill.
Or 751	0,176	400	200	»	714
Cuivre pur	0,182	2000	1000	500	3838
Id. recuit	id.	id.	id.	id.	3842
Platine	0,186	800	600	300	855
Laiton	0,182	»	»	»	200
					900
Acier fondu	»	»	»	»	800
					500
Fer	»	»	»	»	700
					600
Mercure	»	»	»	»	100

La pureté des métaux influe beaucoup sur leur conductibilité ; ainsi ce serait un moyen excellent pour reconnaître leur pureté que de déterminer leur pouvoir conducteur.

2205. M. Pouillet a mis à profit les lois des courants thermo-électriques pour la construction d'un instrument propre à mesurer les degrés de température élevés. Ce pyromètre se compose de deux parties distinctes : le pyromètre lui-même et la boussole qui sert à marquer les degrés. *Pyromètre magnétique. Fig. 659.*

a b est un canon de fusil ; on fait partir de la culasse *c* du fond un fil de platine qui est incorporé dans la masse du fer ; ce fil traverse l'axe du canon pour venir se souder à la pièce de cuivre rouge *x* ; de la culasse annulaire *d* part un autre fil de platine qui vient se souder à la pièce de cuivre *y*. Le premier fil de platine ne touche pas la culasse *d*, pour cela on le maintient avec un corps mauvais conducteur. Les pièces de cuivre *x* et *y* sont portées par une pièce de bois fixée sur le bout du tube.

Pour observer l'intensité du courant, M. Pouillet se sert d'un multiplicateur fermé avec un ruban de cuivre de 15 à 20 millimètres de largeur et d'une aiguille *a b* posée sur un pivot au milieu du multiplicateur ; cette aiguille porte perpendiculairement à sa longueur une lame de bois *c d*, sur laquelle est tracée une ligne de repère servant à juger de la véritable position de l'aiguille. Le multiplicateur et l'aiguille sont montés sur l'alidade mobile d'un cercle divisé. L'appareil est à zéro, quand le plan moyen du multiplicateur est exac- *Boussole des sinus. Fig. 660. Fig. 661.*

tement dans le méridien magnétique et le repère de l'index de l'aiguille tombe sous le fil d'une loupe ou d'une lunette qui est fixée au multiplicateur et qui l'accompagne dans tous ses mouvements. Si un courant passe dans le multiplicateur, l'aiguille est déviée, et l'on tourne l'alidade qui porte le multiplicateur jusqu'à ce que le fil de la lunette arrive au repère de l'aiguille. Le cercle divisé donne la mesure exacte de la déviation, en indiquant de combien de degrés on a dû marcher pour arriver là où l'aiguille s'est arrêtée.

De cette manière, on est bien sûr que l'aiguille a toujours la même position par rapport au courant. Cette boussole est alors boussole de sinus, parce que l'intensité est mesurée par le sinus de la déviation.

L'extrémité du pyromètre est destinée à être la soudure; chaude, on la recouvre d'un lut pour que le fer ne s'altère pas au feu.

On établit la communication du pyromètre avec la boussole au moyen de deux fils de cuivre d'un millimètre de diamètre, terminés par des chevilles de cuivre qui sont fixées, d'une part dans les pièces de cuivre x et y, et d'autre part dans les extrémités du ruban du multiplicateur.

M. Pouillet a gradué cet instrument au moyen de son pyromètre à air et de manière qu'une différence de 100° cent. corresponde à une déviation angulaire de 4 ou 5°.

Froid produit par un courant thermo-électrique.

2206. Nous avons vu que l'application de la chaleur déterminait des courants électriques; on savait également que les courants électriques produisaient de la chaleur, mais on était loin de soupçonner que dans certaines conditions ils pouvaient produire du refroidissement. Voilà cependant ce qui ressort des expériences intéressantes de M. Peltier. Il a remarqué d'abord que dans un circuit composé de plusieurs métaux, il se produisait des températures variées aux soudures des différents métaux faisant partie du circuit, et même des températures différentes suivant le sens du courant. En général, cette température est plus élevée que celle de l'atmosphère environnante; mais, chose remarquable, il a trouvé que dans une soudure de bismuth et d'antimoine, il y avait refroidissement quand le courant passait du premier métal au second. Le fait a été constaté au moyen d'un thermomètre à air, dont la capacité contenait la soudure, et dont l'air

agissait sur une colonne de liquide coloré. Le fait est par conséquent établi avec toute la rigueur qu'exigent des expériences aussi délicates.

CHAPITRE V.

PHÉNOMÈNES D'INDUCTION.

§ I. *Notions générales.*

2207. Les phénomènes d'induction ont été découverts par M. Faraday. Ce grand physicien, préoccupé de l'idée que si l'électricité en mouvement possède le pouvoir de développer le magnétisme, réciproquement les aimants doivent également produire les principaux phénomènes électriques, chercha à faire naître un courant dans un conducteur fermé, placé sous l'influence d'un aimant. Le succès le plus complet couronna ses expériences, et on peut avoir ainsi la preuve la plus décisive de l'identité d'origine entre les phénomènes magnétiques et les phénomènes électriques. Ces nouveaux courants, qui sont ainsi développés dans les corps conducteurs par l'action des aimants ou des autres courants d'origine différente, ont été nommés *courants d'induction;* on pourrait les nommer *courants instantanés* ou *temporaires*, parce qu'ils ne durent qu'un instant. Ils peuvent se subdiviser en *courants électro-électriques* quand ils sont développés sous l'influence de l'électricité voltaïque, et *courants magnéto-électriques* quand ils doivent leur origine à un aimant. **Historique.**

2208. Voici une proposition générale qui résume assez bien les faits principaux de l'induction : *Lorsqu'un conducteur fermé reçoit dans quelques uns de ses points l'action d'un courant, il est traversé par un courant inverse; lorsqu'il cesse de recevoir cette action, il est traversé par un courant direct; et enfin il n'éprouve aucune modification apparente sensible; il n'est traversé par aucun courant, lorsque l'action qui s'exerce* **Proposition générale de l'induction.**

sur lui est constante. Voici les expériences qui établissent la proposition précédente.

Courants électro-électriques.

2209. M. Faraday enroula sur un cylindre de bois deux fils de cuivre d'une trentaine de mètres chacun de longueur, et de 5 millimètres de diamètre; ces deux fils étaient disposés de manière à former deux hélices parallèles très voisines et suffisamment isolées avec de la soie. En mettant les extrémités d'un des fils en communication avec une pile renfermant un grand nombre d'éléments, et celles de l'autre en contact avec les extrémités du fil d'un multiplicateur très sensible, on remarque qu'à l'instant de la fermeture du circuit, le second fil est traversé par un courant dirigé en sens contraire du premier, et qui ne paraît avoir qu'une courte durée, car l'aiguille du multiplicateur revient, après quelques oscillations, au point de départ; quand on interrompt le circuit, l'aiguille est encore déviée, mais le sens de sa déviation indique que le courant qui parcourt le fil est dans le même sens que celui qui était établi d'une manière permanente dans l'autre. M. Faraday a reconnu que le courant induit qui se produit à l'instant où l'on ferme le circuit a plus de puissance que celui qui résulte de l'ouverture.

Si on substitue au multiplicateur une hélice enroulée sur un tube de verre, dans lequel on puisse placer une aiguille non aimantée, les courants passagers qui se manifestent dans le fil influencé, aux instants où le courant voltaïque naît et cesse dans le premier fil, peuvent aimanter l'aiguille qu'on pose dans le tube de verre, soit avant le contact aux pôles de la pile en la retirant avant l'interruption de ce contact, soit après le contact, en interrompant le courant avant de la retirer. La position des pôles produite dans l'aiguille est inverse dans le second cas de ce qu'elle est dans le premier. Si l'aiguille n'est placée dans l'hélice qu'après le contact aux pôles de la pile, et qu'on la retire avant l'interruption de ce contact, elle en sort non aimantée.

Courants magnéto-électriques.

2210. Voici comme on peut démontrer l'existence des courants magnéto-électriques. Si l'on enveloppe l'armature d'un fort aimant en fer à cheval par plusieurs spires d'un long fil de cuivre recouvert de soie, qui s'enroule ensuite autour d'un galvanomètre et dont les deux bouts libres sont enfin réunis par une soudure, de manière à former un con-

ducteur fermé, on observe deux déviations de l'aiguille du multiplicateur, en sens contraire l'une de l'autre, au moment où l'armature touche l'aimant, et à l'instant où elle le quitte; la première déviation indique dans le fil du galvanomètre un courant opposé à celui qui produirait dans le fer de l'armature une polarité semblable à celle qu'il doit à l'influence de l'aimant. Quand l'armature reste en repos, l'aiguille retourne et demeure au zéro de la déviation ; ce qui indique que le fil métallique n'est alors parcouru par aucun courant.

Si on prend un fil métallique recouvert, de 200 mètres de longueur, et enroulé sur une bobine de bois dont l'ouverture intérieure peut recevoir un aimant; si on fait communiquer les deux extrémités de ce fil avec les deux extrémités d'un galvanomètre suffisamment éloigné, à l'instant où l'on introduit le pôle d'un aimant dans l'intérieur de la bobine, on voit l'aiguille du galvanomètre qui est déviée avec plus ou moins de force; mais bientôt elle revient au repos pendant tout le temps que l'aimant reste en place, et si l'on enlève l'aimant, elle s'agite de nouveau dans le sens opposé. La déviation de l'aiguille donne le sens du courant d'induction qui traverse le circuit composé du galvanomètre et de la bobine. Il est facile de reconnaître que ce courant est inverse et marche en sens contraire de celui de l'aimant; lorsque l'aimant commence à agir, et qu'il est direct et marche dans le même sens que celui de l'aimant, quand l'aimant cesse d'agir ou quand on le retire de la bobine. Ainsi, le principe général que nous avons énoncé se trouve complétement vérifié par l'expérience.

2211. Si on fait agir une pile composée d'un petit nombre d'éléments, et dont les deux pôles sont terminés par deux fils métalliques développés, que l'on tient en contact avec les deux mains mouillées, elle ne donne qu'une faible secousse à l'instant où l'on rompt le circuit; mais si l'un des fils métalliques, au lieu d'être droit, est recourbé en hélice à spires très voisines et isolées les unes des autres au moyen de la soie, la secousse est beaucoup plus forte, et si l'on introduit dans l'hélice un barreau de fer doux, ces deux effets acquièrent alors une très remarquable intensité. Ces effets ont été découverts par Henri de Philadelphie, et étudiés par Fara-

Action inductive d'un courant sur lui-même.

day. Il a démontré, par des expériences nombreuses, que lors de la rupture du circuit voltaïque, un courant inverse parcourt instantanément le conducteur interpolaire, et produit des effets d'autant plus intenses que le conducteur est plus long, disposé en hélice, ou contourné; de telle manière que les diverses parties puissent agir par induction les unes sur les autres. L'existence de ce courant secondaire a été mise hors de doute par de nombreuses observations. Nous verrons bientôt de remarquables appareils dont la théorie repose sur cette action inductive d'un courant sur lui-même. Qu'il nous suffise de rappeler ici que l'on peut, au moyen des courants, transformer le fer doux en aimant d'une très grande puissance. Ces aimants particuliers, qui ne tirent leur force que de la présence du courant, peuvent se faire et se défaire en un instant, autant de fois que l'on veut, puisqu'il suffit pour cela de faire passer le courant et de l'interrompre; c'est pourquoi on les appelle *électro-aimants*.

Electro-aimants. M. Pouillet en a fait construire un qui porte plus de 1,000 kilogrammes, quand on lui donne le courant avec une forte pile de 24 paires; il se compose de deux fers à cheval opposés, formés avec des barres rondes de 8 à 10 centimètres de diamètre, et de 60 à 80 centimètres de longueur totale; les deux branches de chaque fer à cheval sont enveloppées d'environ 1,000 mètres de fil de cuivre de 2/3 de millimètres d'épaisseur. C'est le même courant qui traverse les 2,000 mètres de fil; mais les hélices sont formées de telle sorte que les pôles de noms contraires se trouvent en présence.

Un des électro-aimants est fixe, il soulève l'électro-aimant mobile, et ils s'appliquent l'un contre l'autre avec tant de force, que l'on peut charger l'électro-aimant mobile du poids énorme de 1,000 kilogrammes.

§ II. *Appareils électro-magnétiques.*

Appareil Pixii. 2212. Le premier appareil qui a permis d'obtenir des courants dus à l'influence d'un aimant, tous les effets connus de l'électricité voltaïque, a été construit par M. Pixii, il consiste fig. 662, dans un aimant artificiel ACDB, composé de plusieurs barreaux disposés en fer à cheval; il est mobile

Fig. 662.

autour d'un axe X Y ; ce mouvement est imprimé au moyen d'une manivelle et d'engrenages convenables. Au-dessus de l'aimant se trouve fixé un morceau de fer doux E G H F, pareillement en fer à cheval, lequel est placé de telle manière que les bases E et F soient très près des extrémités planes A et B de l'aimant, mais sans les toucher, lorsque ce dernier dans son mouvement se trouve directement au-dessus du fer doux. Un même fil de cuivre recouvert de soie, et ayant ses extrémités en P et Q, s'enroule dans le même sens autour des branches verticales E G, H F, du fer doux, où il forme plusieurs milliers de tours. D'après cette disposition, l'influence de l'aimant développe du magnétisme dans le fer doux ; mais le sens de l'aimantation se trouve renversé à chaque demi-révolution. Le courant électrique que ce changement perpétuel entretient dans le fil conducteur, change de sens à chaque demi révolution de l'aimant, ou à chaque passage de ses pôles au-dessous de l'arc en fer.

On peut constater l'existence du courant électrique dans le fil conducteur, et ses renversements successifs de la manière suivante : on attache les extrémités P et Q au deux bouts du fil d'un multiplicateur, on fait exécuter à l'aimant deux demi-révolutions dans le même sens, on observe lors de la seconde impulsion une déviation de direction contraire à la déviation observée lors de la première ; l'aimant étant constamment en mouvement, si l'on touche un instant, avec les deux extrémités du fil métallique, les plateaux d'un électro-mètre condensateur, on trouve ensuite cet instrument chargé d'électricité, tantôt positive, tantôt négative ; ce qui dépend du sens du courant existant lors de l'interruption des contacts.

Lorsqu'on imprime à l'aimant un mouvement de rotation rapide, on peut reproduire la plupart des phénomènes dus au passage rapide de l'électricité, on peut ainsi très facilement opérer la décomposition de l'eau ; mais comme deux courants opposés se succèdent incessamment, on a dans les deux cloches un mélange d'oxygène et d'hydrogène, au moyen de l'usage ingénieux d'une bascule mue par un excentrique. M. Pixii est parvenu à changer le sens des communications à chaque demi-tour de l'aimant et par conséquent à obtenir

dans l'eau des courants d'induction toujours dans le même sens, et dès lors on a, comme de coutume, obtenu l'hydrogène dans une cloche et l'oxygène dans l'autre. En faisant communiquer l'un des bouts des fils de cuivre avec du mercure contenu dans un petit flacon (et approchant beaucoup l'autre bout de ce fil de la surface de ce même mercure), on a réussi à produire des étincelles très brillantes, et aussi nombreuses que les demi-tours opérés par l'aimant.

On peut au moyen de l'appareil de M. Pixii, et en lui imprimant toujours un mouvement de rotation rapide, déterminer tous les effets physiologiques de l'électricité en mouvement; si, tenant à la main les deux extrémités P et Q, on fait glisser l'une sur l'autre leurs parties nues, en les approchant et en les éloignant successivement à de petites distances, on aperçoit entre elles une suite d'étincelles électriques. Alors on éprouve des commotions dues à la décharge de l'électricité qui parcourt le fil conducteur; laquelle s'opère à travers les deux bras, dans l'intervalle de deux étincelles. On éprouve des commotions plus fortes lorsqu'on plonge les mains dans deux vases contenant un liquide acidulé, que ces organes font ainsi communiquer, et dans lesquels aboutissent les extrémités P et Q, qu'il est convenable d'attacher à des plaques métalliques immergées.

Ainsi, rien ne manque au caractère galvanique des courants produits par induction dans un fil de cuivre, au moyen de l'approche et de l'éloignement d'un aimant puissant; la théorie ingénieuse de M. Ampère, de l'identité de cause entre les effets magnétiques et les effets électriques, reçoit ainsi sa plus brillante confirmation.

Appareil de M. Masson pour déterminer des commotions au moyen des courants interrompus.

2213. M. Masson a imaginé une disposition d'appareil qui, par les interruptions successives d'un circuit, peut multiplier les secousses dues au courant secondaire de manière à produire une très forte commotion. Il s'est servi à cet effet d'une roue dentée, d'un rayon assez grand à laquelle on imprime un mouvement de rotation à l'aide de la corde sans fin d'un rouet; l'un des coussinets communique avec l'un des pôles de la pile, l'autre avec une main de la personne soumise à l'expérience. De l'autre main on saisit fortement l'un des bouts d'une hélice enroulée sur un cylindre de fer doux, et en communication par l'autre bout avec

le second pôle de l'appareil voltaïque. D'après cette disposition le circuit est formé de l'appareil voltaïque, de l'hélice, du corps de l'expérimentateur et de l'axe de la roue dentée. Le courant ne s'y manifeste pas quand l'hélice est composée de 4 à 500 mètres de fil; il n'en est plus de même quand le corps humain cesse de faire partie du circuit, c'est-à-dire lorsque celui-ci est tout métallique. Cette condition est remplie quand le premier bout de l'hélice que l'expérimentateur tient à poignée est terminée par une lame de ressort aplati qui, maintenue à la naissance par un appui fixe, va presser par son extrémité libre une dent de la roue de métal. Aussitôt que la roue commence à tourner, ce circuit, qui est tout métallique, se trouve interrompu à l'instant où la dent pressée échappe au ressort qui la touche; alors le premier circuit, celui dont l'opérateur fait partie, subsiste seul et donne naissance à une vive secousse. La roue continuant à tourner, une nouvelle dent vient toucher le ressort, et, à l'instant où elle s'échappe, on éprouve une secousse aussi vive que la première fois. On conçoit que la roue tournant d'une manière uniforme, le même phénomène se reproduit d'une manière périodique au passage de chaque dent. M. Masson est parvenu à tuer un chat en 5 minutes en le soumettant aux décharges rapidement répétées d'une pile composée de quelques éléments. Si le mouvement de la roue est très rapide, la sensation diminue par degrés et finit par disparaître, dans ce cas tout se passe comme si le circuit n'était pas interrompu.

2214. On éprouve des commotions par les interruptions d'un courant magnéto-électrique quand on emploie l'appareil de M. Clarke, comme lorsqu'on se sert de l'appareil de M. Masson (2213). La machine de Clarke que nous allons décrire se recommande par ses bonnes dispositions et par la puissance des effets qu'elle peut produire. Voici les parties principales qui la composent : A (fig. 663) représente une série de six barreaux d'acier aimanté, recourbés en fer à cheval, disposés verticalement et reposant sur quatre vis fixées à la planche d'appui B.

Appareil de M. Clarke.

Fig. 663.

Une barre épaisse de cuivre C est percée en son milieu, d'une ouverture dans laquelle passe un pêne avec une vis tournante destinée à maintenir l'aimant contre la planche *b*.



On peut par ce moyen enlever facilement l'aimant sans déranger le reste de l'appareil. D représente l'armature d'un double cylindre de fer doux, G, F, laquelle est fixée dans un mandrin de cuivre placé entre les pôles de la batterie A.

Cette pièce est mise en mouvement au moyen de la roue E, d'un axe de rotation et d'un fil sans fin. Sur chaque cylindre est enroulé en hélice un fil de cuivre entouré de soie d'une longueur de 750 mètres. L'un des bouts de chaque hélice est soudé à l'armature du milieu, à laquelle est fixée en D, perpendiculairement à sa surface, une tige de cuivre munie de deux pièces de rupture H.

K représente un cylindre creux de cuivre auquel est soudé l'un des bouts libres des hélices, et qui est séparé de la tige au moyen d'un morceau de bois dur qui repose dessus; l'autre bout des hélices communique avec la tige.

O est un ressort en fil de fer destiné à exercer une pression contre le cylindre creux K, avec lequel il est en contact métallique au moyen d'une vis fixée dans la plaque de cuivre M.

P représente une tige de cuivre verticale, carrée, s'adaptant à la plaque de cuivre N.

Q est un ressort de métal exerçant une faible pression sur la pièce de rupture H. Elles est tenue en contact métallique au moyen d'une vis à tête.

T est un fil de cuivre destiné à rétablir la communication entre les deux plaques de cuivre M, N.

Au moyen de cette disposition, ces diverses parties D, H, Q, P, N, sont en communication avec un des bouts, et K et M avec les deux autres bouts.

On conçoit très bien que le ressort Q pressant doucement sur la pièce de rupture H, les effets sont réguliers.

Les faces des cylindres de fer F, G, autour desquels sont enroulées les hélices, sont parallèles autant que possible avec celles du fer à cheval A et en contact avec lui. Quand ce contact n'est pas établi, on dévisse l'écrou de la roue E, et on l'enlève de son axe au moyen des quatre vis dont il a été parlé ci-dessus, et de la vis de la plaque C; on ajuste alors la batterie avec la plus grande facilité.

Il faut encore que la pièce de rupture soit disposée de manière que le ressort Q se sépare en même temps que les cylindres de fer de l'armature quittent les pôles de l'aimant;

quant au ressort en fil de fer O, il presse toujours et doucement contre le cylindre creux de cuivre K.

Lorsqu'on veut donner une commotion avec cette machine, on prend dans les deux mains, humectées avec une dissolution d'eau salée, les deux conducteurs de cuivre R, S, dont l'un est en communication avec la plaque M, et l'autre avec la plaque N de la manière indiquée sur la figure; puis M, N, sont réunis au moyen de la tige T. La commotion que l'on reçoit avec cet appareil, dès l'instant que l'on tourne la roue, est violente. Si l'on veut avoir un courant toujours dirigé dans le même sens, on ne met qu'une seule pièce de rupture. Dans ce cas, le circuit est interrompu quand le courant change, c'est-à-dire lorsque chaque hélice quitte une branche de l'aimant. A l'instant où l'on reçoit le choc, les muscles des bras se contractent avec violence, de manière à forcer les mains à serrer fortement les conducteurs, en leur ôtant tout pouvoir de s'en détacher. En plaçant les deux fils de communication R, S, entre M, N, le choc n'est pas aussi puissant.

U et V sont des tiges en rapport avec les fils conducteurs, et munies de morceaux d'éponge dont on fait usage dans les applications de l'électricité à la médecine; ces éponges sont humectées de solutions acides ou salées, on peut avec leur secours donner une succession de chocs les plus puissants là où il est nécessaire.

Quand on fait fonctionner cet appareil, si l'on regarde entre la face de l'armature de rotation et l'aimant en fer à cheval, on aperçoit une vive lueur qui va de l'un à l'autre; on aperçoit encore cette lumière aux pointes de rupture, on la voit aussi quelquefois briller entre les hélices F, G.

Au moyen de dispositions ingénieuses, M. Clarke a pu à l'aide de la même machine effectuer la décomposition de l'eau, brûler des fils métalliques, obtenir des étincelles de diverses couleurs, produire la combustion du charbon et déterminer les phénomènes de rotation; en un mot, c'est un appareil électro-moteur d'une admirable disposition qui peut produire tous les effets de la pile.

2215. M. Henry de New-Jersey a obtenu des effets d'induction d'une très grande intensité avec de faibles courants

Spirales et hélices inductrices.

voltaïques sans se servir d'aimants conducteurs ni d'armatures en fer ; les divers appareils dont il fait usage consistent en spirales plates formées d'un ruban de cuivre recouvert de soie, et en hélices composées de fils longs ; il les distingue par des numéros. La spirale n° 1 est composée d'une lame de cuivre du poids de 14 kilogrammes, de 30 mètres de longueur, et de 4 centimètres de largeur.

Lorsque l'électricité a une faible intensité, comme dans le cas où l'on emploie une pile thermo-électrique, ou un seul grand couple voltaïque, faiblement excité avec une dissolution acide, on obtient, avec la spirale n° 1, les déflagrations les plus brillantes, tandis que les commotions sont très faibles.

L'hélice n° 1 est formée d'un fil de cuivre de 603 mètres de long et d'un demi-millimètre de diamètre. Si on prend une très petite batterie, composée seulement de 6 morceaux de laiton et d'un nombre égal de morceaux de zinc, quand le courant de cette batterie passe dans un fil de cuivre enroulé en hélice, recouvert de coton, de 4,570 mètres de long, et disposée sur une roue qui tourne sur un petit axe de fer, la commotion se fait sentir à plus de vingt personnes à la fois se donnant la main. Cette action extraordinaire suffit pour donner une idée des effets produits par les courants indirects ayant une intensité considérable, quoique produits par une petite quantité d'électricité.

La forme du métal enroulé a une grande influence sur l'intensité des courants. On obtient de plus grands effets en employant des rubans au lieu de fils. Dans ce cas, les différentes spires étant plus rapprochées, doivent exercer une plus grande influence les unes sur les autres.

Influence de l'interposition de diverses substances sur l'induction.

2216. Si on place l'hélice n° 1 à environ 14 centimètres de la spirale n° 1 ; si l'on interpose entre elles une plaque de fer laminé, d'environ 1 millimètre d'épaisseur, il est impossible alors d'obtenir les chocs, tandis qu'ils sont très intenses en retirant la plaque ; en substituant une plaque de zinc à la plaque de fer, l'effet est le même ; tous les conducteurs parfaits se comportent de la même manière, tandis que les corps non conducteurs, comme le verre et le bois, ne pa-

raissent exercer aucune influence pour arrêter ou diminuer l'induction.

2217. L'interposition d'une plaque conductrice, faisant naître entre le courant primitif et le courant secondaire un nouveau courant qui détruit l'effet du primitif, on devait en conclure que, si le premier pouvait être écarté ou séparé de l'influence de l'autre, on pouvait avoir un courant induit dans un troisième conducteur; l'expérience a confirmé cette prévision, et a montré qu'on pouvait également observer des courants d'un ordre plus élevé. M. Henry, à la suite d'un grand nombre de recherches, a été conduit à ce fait important, que les courants des différents ordres changent alternativement de direction, à partir du courant secondaire. **Des courants induits de différents ordres.**

2218. Tous les courants électriques produisent l'induction; c'est un fait général qui a été démontré par M. Henry pour la décharge de la bouteille de Leyde, par un comité de l'Institut de Franklin, pour l'électricité atmosphérique, et par M. Zantedeschi, pour les courants thermo-électriques. **Des courants induits produits au moyen de l'électricité ordinaire, atmosphérique, thermo-électrique.**

§ III. *Magnétisme en mouvement.*

2219. M. Arago avait découvert un genre d'action mutuelle entre les aimants et des corps regardés jusque là comme insensibles au magnétisme; les expériences de M. Faraday, relatives aux courants produits par l'influence des aimants, ont donné la clef de ces phénomènes, qui formaient une théorie physique détachée, à laquelle on donnait le nom de *magnétisme en mouvement.*

M. Arago découvrit en 1822 ce fait important. Quand une aiguille aimantée oscille très près d'une plaque solide ou d'une masse liquide placée au-dessous d'elle, elle éprouve une sorte de résistance indépendante de celle de l'air, qui anéantit bientôt les oscillations sans influer sensiblement sur leur durée, et d'autant plus rapidement pour le même corps, que sa distance à l'aiguille est plus petite. Par exemple, si la plaque est en cuivre, et si elle est suffisamment voisine de l'aiguille, la diminution successive des amplitudes peut être telle que l'aiguille ne fasse que trois ou quatre oscillations d'une étendue sensible avant de revenir au repos, **Expériences de M. Arago.**

tandis que l'on en pourrait compter trois à quatre cents s'il n'y avait d'autre résistance que celle de l'air. M. Arago a reconnu à des signes différents le même genre d'influence dans les autres métaux, dans le verre, l'eau, la glace, etc.

Cette influence des différents corps sur l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée a été étudiée par plusieurs physiciens, Nobili, Seebeck, Baumgaertener, etc.; depuis, M. Arago a fait des expériences en sens contraire; il a soumis l'aiguille en repos à l'action des diverses plaques en mouvement, il en est résulté des phénomènes remarquables que nous allons faire connaître lorsque nous aurons décrit l'appareil qu'il a employé. Il est représenté dans la fig. 664,

Fig. 664. *ab* est un plateau circulaire de cuivre rouge ou de toute autre substance, fixé par son centre à la tige verticale *xy*, à laquelle on donne un mouvement rapide de rotation au moyen d'une horloge; *cd* est une ouverture circulaire faite dans le plateau MN, elle est fermée inférieurement par une feuille de papier collée sur les bords; ABCD est une cloche de verre dont la tubulure est garnie d'une douille terminée par un petit treuil, autour duquel s'enroule un fil de soie *mn* qui supporte l'aiguille aimantée. Dès que le mouvement du plateau *ab* commence, l'aiguille est déviée dans le sens de la rotation; si la vitesse de la plaque n'est pas trop considérable, l'aiguille parvient, après un temps très court, à une position stationnaire, dans laquelle l'action de la plaque fait équilibre à l'action magnétique de la terre, qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. L'angle dont elle s'en écarte dans cette position dépend de la distance de l'aiguille au plateau, de la vitesse et de l'épaisseur de la plaque; il augmente avec cette vitesse jusqu'à ce que la déviation soit de 90°. Alors l'aiguille est entraînée et prend elle-même un mouvement de rotation dans le même sens que celui du plateau. En changeant le sens du mouvement du disque de cuivre, l'aiguille est bientôt entraînée dans ce nouveau sens. On ne peut attribuer ces mouvements remarquables à l'action de l'air, car l'aiguille aimantée est séparée du disque par une plaque de verre ou une membrane tendue.

Influence de la distance. 2220. La force magnétique que prennent les corps en mouvement, décroît à mesure que la distance augmente;

ainsi, l'aiguille qui tourne d'un mouvement continu lorsqu'elle n'est séparée du disque que par l'épaisseur d'une membrane, n'éprouve plus, lorsqu'on la soulève graduellement, que des déviations déterminées. M. Arago a démontré que la résultante des forces exercées par le plateau tournant sur l'aiguille aimantée est oblique au plan de ce plateau. De ces trois composantes, l'une, normale à ce plan mobile, est constamment répulsive; la deuxième, parallèle à la tangente, est toujours dirigée dans le sens du mouvement; enfin, la troisième, dans le sens du rayon, va du centre à la circonférence ou inversement, suivant la position du pôle de l'aiguille sur le rayon.

Ainsi, quand la pointe de l'aiguille tombe au-dehors du disque, elle est repoussée loin du centre de rotation; cette force répulsive diminue à mesure qu'on avance l'aiguille vers le centre; elle est nulle à une certaine distance de ce point, et se change ensuite en force attractive pour redevenir nulle au centre lui-même.

2221. Lorsqu'un disque offre des solutions de continuité où des fissures dans le sens de ses rayons, il perd une grande partie de sa force; en ressoudant les bords avec un métal quelconque, même avec du bismuth, quand le disque est de cuivre, on lui rend presque la totalité de la force qu'il avait perdue. Mais en remplissant seulement ces intervalles avec des poudres métalliques bien pressées, ou avec des liquides, tels que l'eau ou l'acide sulfurique, on ne parvient pas à réparer sensiblement ses pertes d'intensités. Influence des solutions de continuité.

2222. Toutes les substances ne produisent pas par leur mouvement les mêmes effets sur l'aiguille. Les métaux agissent plus que les autres substances, et plusieurs physiciens n'ont pas obtenu d'effets sensibles avec le verre, le bois, l'eau, etc. D'après MM. Herschell et Babbage, les effets relatifs de différents métaux sont représentés par les nombres suivants : Action des diverses substances.

Cuivre.	1,00	Antimoine. . .	0,09
Étain.	0,46	Zinc.	0,03
Plomb.	0,25	Bismuth. . . .	0,02

M. Haldat a démontré qu'un disque de fer doux agit avec plus d'énergie qu'un disque de cuivre; avec la même Expérience de M. Haldat.

vitesse, il produit une déviation deux fois plus grande. Le fer fortement écroui se comporte comme le fer doux; mais un disque d'acier non trempé ne produit point d'effet; l'aiguille, après quelques oscillations, reprend sa position primitive. Les disques incandescents produisent le même effet qu'à la température ordinaire. Ces remarques ont été confirmées et étendues par M. Barlow.

Explication du magnétisme en mouvement.

2223. Tous les phénomènes que nous venons de rapporter paraissaient bien inexplicables d'après les anciennes idées qu'on avait adoptées sur la constitution des aimants. Elles seraient demeurées inexplicables sans la découverte de M. Faraday sur les courants par induction. Mais il est aujourd'hui démontré que le voisinage de l'aiguille détermine dans le point du cuivre ou des autres métaux dont elle s'approche ou s'éloigne des courants par induction opposés les uns aux autres.

Si au lieu d'une aiguille mobile on suspend au-dessus du disque tournant un aimant fixe et assez énergique, on reconnaît bientôt que le disque est traversé par des courants électriques dont la direction très remarquable a été analysée par MM. Nobili et Antinori. Si nous ne considérons qu'un seul pôle, la flèche *f* indiquant le sens de rotation du disque, on observe aisément, avec les deux extrémités du fil du galvanomètre, qu'il y a de chaque côté du pôle des courants dont le sens est indiqué par la direction des flèches. On voit donc que les parties du disque qui arrivent sous le pôle prennent des courants opposés à ceux qui constituent l'aimant au point le plus voisin, et qu'au contraire les parties du disque qui viennent de passer sous le pôle et qui s'en éloignent, prennent des courants marchant dans le même sens que ceux de l'aimant, dans les points qui sont les moins éloignés d'elles.

Fig. 665.

On comprend alors que les attractions et les répulsions qui s'établissent entre ces courants d'induction et les courants constitutifs des aimants, qui sont ici les courants inducteurs, doivent nécessairement donner naissance à des forces capables de mouvoir les aimants, quand ceux-ci sont mobiles. Lorsqu'en effet on fait l'analyse complète de ces forces, on reproduit tous les résultats découverts par M. Arago et par les autres observateurs qui se sont occupés du magnétisme en mouvement.

2224. M. Faraday, en s'appuyant sur de nombreuses expériences, assimile l'induction au mode de propagation du fluide électrique dans les corps conducteurs; néanmoins, avec cette différence capitale que, dans le premier cas, il n'y a pas transmission d'électricité d'une particule à une autre, tandis que dans le second cette transmission a lieu. Nous ajouterons que l'induction n'exige pas d'épaisseur sensible dans les corps conducteurs dont on fait usage pour limiter son étendue, puisqu'une feuille d'or non isolée peut être rendue positive sur une surface, et négative sur l'autre, pendant que l'induction continue, tandis que dans les diélectriques leur épaisseur a une influence immédiate et importante sur le degré d'induction. Remarque générale sur l'induction.

L'induction paraît donc consister en un certain état de polarisation des particules des diélectriques, produit par le corps électrisé qui maintient l'action; état qui doit être forcé, parce qu'il n'est produit et maintenu que par la force, et qui cesse dès l'instant que la cause qui lui a donné naissance n'existe plus. Lorsque cette force est supérieure à la force d'agrégation ou aux affinités, les molécules sont alors séparées ou décomposées.

Le principe qui produit l'induction manifeste son action dans tous les phénomènes électriques; c'est lui qui constitue la charge qui préside au dégagement de l'électricité et à la production des courants, etc. Et nous devons donc ajouter, avec M. Becquerel, qu'on ne saurait donner trop d'attention à l'étude des phénomènes qui peuvent toujours exercer leur influence dans toutes les expériences de l'électricité.

CHAPITRE VI.

PHÉNOMÈNES ÉLECTRO-CHIMIQUES.

---

§ I. *Des courants produits dans les actions chimiques.*

2225. On donne le nom d'*électro-chimie* à cette partie de la science qui s'occupe de déterminer l'existence des courants Définition de l'électro-chimie.

dans les actions chimiques, et qui nous fait connaître l'influence qu'exerce l'électricité en mouvement pour détruire des combinaisons chimiques, ou pour en opérer de nouvelles; cette branche de la physique qui a des rapports nombreux avec la chimie, a pris dans ces dernières années un accroissement tel que nous devons nous borner à en exposer les principes, à discuter les principales questions théoriques qui s'y rattachent, et à indiquer les plus remarquables applications.

Principe général du développement de l'électricité dans les actions chimiques.

2226. Le principe général de développement de l'électricité dans les actions chimiques qui a reçu un grand nombre de démonstrations expérimentales de la part de M. Becquerel, peut s'examiner ainsi : quand deux corps se combinent, du fluide naturel est décomposé, le corps qui joue le rôle d'acide se charge d'électrité positive; celui qui joue le rôle de base prend l'électricité négative.

Courants produits par l'action des acides sur un métal.

2227. Si on plonge en même temps dans une capsule de porcelaine contenant de l'acide nitrique, une même longueur de deux fils d'or ou de platine, dont les deux autres bouts sont mis en communication avec le fil d'un galvanomètre très sensible, on n'observe aucun courant, mais si l'on verse près de la partie immergée de l'un des fils quelques gouttes d'acide chlorhydrique pour former de l'eau régale qui attaque le métal le plus voisin, la déviation de l'aiguille du galvanomètre signale aussitôt un courant, et le sens du courant indique que le métal attaqué prend l'électricité négative et l'acide l'électricité positive. Le même procédé peut s'appliquer à tous les métaux; mais on observe quelquefois des courants variables, et pour l'intensité et pour le sens, ce qui tient à plusieurs causes que M. Becquerel a démontrées avec beaucoup de bonheur. En effet, quand un acide agit sur un métal, il peut y avoir de l'électricité développée par quatre causes principales : 1° production de chaleur; 2° formation d'un composé; 3° action de ce composé sur le métal; 4° action de ce composé sur le liquide; on ne peut toujours distinguer précisément quelle est la cause du courant.

Courants produits par l'action des sels sur les métaux.

2228. Pour éviter les causes d'incertitude que nous venons d'énoncer, l'on plonge deux lames d'un métal de cuivre, par exemple, terminant les fils de galvanomètre, dans deux capsules remplies d'une dissolution de nitrate de

cuivre, et réunies par une mèche d'amiante. Si on verse de l'acide nitrique dans une des capsules, cet acide rend négative la lame qui s'y trouve plongée; et le courant se manifeste immédiatement; cet effet doit nécessairement être attribué à l'action chimique que l'acide exerce sur le métal; car le nitrate de cuivre qui se forme ne peut exercer qu'une action très faible sur la dissolution du même sel qui l'environne. On peut varier cette expérience en employant d'autres métaux et leurs dissolutions, le zinc avec son nitrate, le fer avec son chlorure, etc. Dans ces différents cas le sens du courant indique que la lame de métal attaquée prend au liquide l'électricité négative.

Courants produits par l'action d'un même liquide sur deux métaux.

2229. Lorsque les deux extrémités du galvanomètre terminés par des lames de métaux différents, plongent dans deux capsules contenant un même liquide, et réunis par une mèche d'amiante, si les deux métaux sont attaqués, le sens du courant indique généralement celui qui l'est plus fortement; quand on prend, par exemple, du zinc et du cuivre qu'on plonge dans l'acide sulfurique très étendu, le zinc prend l'électricité négative comme s'il était seul attaqué. Il ne faut pas oublier que dans toutes les expériences de cette nature, les sels qui se forment réagissent sur les métaux eux-mêmes; en sorte que la cause des courants observés est toujours très complexe.

Courants produits par l'action des liquides sur les liquides.

2230. Le développement de l'électricité déterminé par l'action mutuelle de deux liquides a été constaté par M. Becquerel au moyen de méthodes aussi simples qu'ingénieuses : 1º on fait plonger les deux bouts d'un galvanomètre, se terminant par des lames de platine (1), dans deux capsules de porcelaine contenant de l'acide nitrique que l'on réunit au moyen d'une mèche de coton imbibée d'eau; si l'on verse ensuite doucement vers le milieu de cette mèche une goutte de chacun de ces deux liquides dont on veut

(1) Dans toutes ces expériences, quand on emploie des lames de platine comme corps conducteurs pour former le circuit galvanométrique, il est une précaution indispensable, c'est de faire bouillir ces lames dans de l'acide nitrique puis dans de l'eau distillée, et de les laisser ensuite quelque temps en contact avec les liquides dans lesquels elles doivent être plongées, car il adhère souvent à ces lames des corps étrangers qui pourraient déterminer la production de courants secondaires.

étudier l'action : au moment de leur contact on observe un courant dont le sens indique les états électriques des deux liquides au moment de leur combinaison ; 2° si les deux capsules qui reçoivent les bouts en platine du multiplicateur, sont séparément remplies des deux liquides dont on veut étudier l'action ; si on les réunit par une lame de platine doublement recourbée, il n'y a pas encore de courant observable ; mais si sur cette lame de platine on dispose une mèche d'amiante qui mette en communication les deux dissolutions, le courant dû à leur action mutuelle est bientôt manifesté ; 3° enfin, on peut se servir d'une cuillère de platine attachée à l'un des bouts du galvanomètre, et dans laquelle on verse un des liquides, puis on y plonge une lame de platine fixée à l'autre bout, après l'avoir préalablement mise en contact avec la seconde dissolution ; et l'on voit de même apparaître un courant dont le sens indique encore les états électriques des deux liquides au moment de leur union. M. Becquerel a encore employé cette dernière disposition pour étudier l'action d'une substance solide sur le liquide de la cuillère ; il faut alors substituer à la lame de platine une pince du même métal qui est destinée à maintenir un morceau de la substance sur laquelle on veut expérimenter. Parmi les faits nombreux observés par M. Becquerel, voici les principaux qui se déduisent tous du principe général que nous avons énoncé en commençant ce chapitre. Quand les deux liquides essayés sont un acide et un alcali, le sens du courant indique toujours que l'acide prend l'électricité positive, et l'alcali l'électricité négative. Dans l'action dissolvante de l'eau sur un acide, l'eau se comporte comme un alcali ; lors de son action sur un alcali, elle joue le rôle d'un acide. L'acide phosphorique est toujours positif lorsqu'il se dissout dans d'autres acides. L'acide nitrique est positif avec les acides hydrochlorique, acétique, nitreux ; négatif au contraire avec les acides sulfurique, phosphorique. Lors de l'action mutuelle de deux dissolutions de sels neutres, la plus saturée prend l'électricité positive ; si les sels dissous sont acides ou alcalins, les deux liquides se conduisent comme des acides ou des alcalis. Les doubles décompositions des sels neutres s'opèrent sans dégagement d'électricité.

L'intensité du courant produit dans une action chimique ne dépend pas uniquement de l'énergie de cette action; car les fluides électriques séparés lors de la combinaison se neutralisent presque complétement au lieu même où elle s'opère; en sorte que le fil du multiplicateur ne donne passage qu'à la très faible portion de ces deux fluides qui échappent à une recomposition immédiate.

2231. Voici comment M. Pouillet a constaté qu'il se dégageait de l'électricité pendant la combustion: Si on place à quelques centimètres au-dessous du plateau supérieur d'un condensateur un cylindre de charbon communiquant avec le sol, en allumant le charbon à sa partie supérieure, la colonne d'acide carbonique qui s'élève transmet au plateau de l'électricité positive; si on place le charbon sur le plateau supérieur, par sa combustion le plateau se charge d'électricité négative; ainsi, dans la combustion du charbon, l'acide carbonique se charge d'électricité positive et le charbon d'électricité négative. Le même effet se produit dans la combustion de l'hydrogène; en faisant dégager ce gaz à l'extrémité d'un tube métallique isolé et communiquant avec un des plateaux du condensateur, ce dernier se charge d'électricité négative. *Électricité développée par la combustion.*

§ II. *Conductibilité.*

2232. L'électricité se meut avec une vitesse très grande dans les corps conducteurs : si on établit, par exemple, une communication entre deux pôles d'une pile au moyen d'un fil de cuivre de 200 mètres de long, et si on place une aiguille aimantée en un point quelconque du fil, on ne peut observer aucun intervalle de temps appréciable entre l'instant de la fermeture du circuit et de l'ébranlement de l'aiguille. On ignore si la vitesse de l'électricité varie suivant la nature des corps conducteurs et suivant la source électrique. *De la vitesse des courants.*

2233. On entend par faculté conductrice d'un corps pour l'électricité la propriété dont il jouit de laisser passer plus ou moins d'électricité relativement à un autre corps de même volume pour terme de comparaison. On a employé divers procédés pour trouver les rapports de conduc- *Faculté conductrice des métaux.*

tibilité entre les métaux; nous allons en exposer les principes.

Méthode de Davy.

Voici la méthode dont Davy a fait usage : elle consiste à prendre des fils de différents métaux, de même longueur et de diamètres égaux, et à rechercher combien chacun d'eux peut décharger de plaques voltaïques construites suivant la méthode de Wollaston. Pour s'assurer si un fil décharge entièrement une pile, on ajoute deux autres fils conducteurs en argent aux deux extrémités de cette pile, lesquels viennent plonger dans l'eau rendue conductrice par l'addition d'un sel ou d'un acide : la communication se trouve donc établie entre les deux extrémités de la pile, d'une part avec le fil dont on cherche le pouvoir conducteur et de l'autre avec les deux fils d'argent qui plongent dans le liquide. En opérant ainsi, toutes les fois qu'il y avait dégagement de gaz, Davy en concluait que toute la décharge de la pile ne passait pas dans le fil d'essai.

Si on suppose les quantités d'électricité produites par les piles proportionnelles au nombre des éléments, et en comparant les longueurs et les sections des fils de même nature qui déchargent des piles renfermant des nombres différents d'éléments, Davy est parvenu à établir ces deux lois générales : *la conductibilité est en raison inverse de la longueur du fil et proportionnelle à sa section.* En comparant les nombres de couples que déchargent des fils de même longueur, de même diamètre et de différente nature, le même physicien a obtenu les conductibilités relatives de ces corps que nous donnerons plus loin.

Méthode de M. Becquerel.

M. Becquerel est parvenu par des moyens plus exacts à vérifier les lois de Davy, et a établi le coefficient de conductibilité de divers métaux. Si on prend, par exemple, deux fils de même nature, de même longueur et de même diamètre, enroulés en sens contraire sur le cadre d'un multiplicateur, les quatre extrémités des fils plongeant dans quatre capsules pleines de mercure que nous désignerons par n et p et n' et p'; supposons maintenant qu'un des pôles d'une pile quelconque soit mis en communication par des fils identiques avec les capsules n et n', et que l'autre pôle communique de la même manière avec les capsules p et p' : les courants qui parcourront le multiplicateur seront égaux et l'action sur l'aiguille sera nulle ; mais si on fait communiquer les capsules n et n',

ainsi que les capsules p et p', par des fils conducteurs non identiques, l'aiguille du multiplicateur ne sera immobile qu'autant que ces deux fils auront la même faculté conductrice. On trouve ainsi qu'un fil de cuivre conduit autant que deux fils de même diamètre d'une longueur double ou que trois fils de même diamètre d'une longueur triple; d'où résultent les deux lois trouvées par Davy.

Voici le tableau des résultats obtenus par divers physiciens pour le pouvoir conducteur des métaux en représentant celui du cuivre par 100.

DAVY. Électricité voltaïque.	BECQUEREL. Électricité voltaïque.	CUMMINGUE. Électricité thermoïque.	HARRIS. Électricité ordinaire.	CHRISTIE. Électricité d'induction.	POUILLET. Électricité d'un seul couple.
Argent. 109,	Cuivre.. 100,	Argent.. 176,5	Cuivre.. 100,	Argent. 15,2	
Cuivre.. 100,	Or . . 93,6	Cuivre.. 100.	Argent. 100,	Or. . . 110,6	
Or . . . 73,	Argent.. 73,6	Zinc. . 33,	Or. . 66,7	Cuivre. 100,	Argent. 116
Plomb. 69,	Zinc . . 28,5	Or. . . . 35,2	Zinc. . . 33,3	Zinc. . 52,2	Cuivre. . 100
Platine. 18,	Platine. 16.	Fer . . . 21,1	Platine. 20,	Étain. . 25,3	Or fin. . 94
Fer. . . 14,5	Fer. . . 15,8	Étain. . 23,9	Fer . . 20,	Platine. 25,5	Fer. . . 16
	Étain . 15,[illegible]	Platine. 21,6	Étain. . 16,[illegible]	Fer . . 22,3	Platine. 13
	Plomb. . 8.	Plomb . 26,8	Plomb. . [illegible]	Plomb.. 12,4	Laiton. . 12

D'après M. Becquerel tous ces résultats ne sont pas comparables, il n'y a que ceux qui sont compris dans la deuxième et la quatrième colonne que l'on puisse comparer; M. Harris, pour arriver aux nombres que nous avons donnés, a mesuré la chaleur produite par le passage de l'électricité et a admis qu'elle était en raison inverse de sa conductibilité.

L'appareil employé par M. Christie consistait en un cylindre de fer doux (fig. 666), entouré d'une spirale de cuivre dont les deux bouts se rendaient aux deux extrémités a et b d'un rhéomètre à un seul fil; mais les points c et b, ainsi que les points a et d, étaient réunis par des fils égaux du métal qu'on voulait comparer avec le cuivre et dont on faisait varier la longueur jusqu'à ce que l'aiguille restât stationnaire. En approchant des points a et b les pôles n et s d'un aimant à fer à cheval, les longueurs des fils ac et be servaient à déterminer la conductibilité, en supposant que les facultés conductrices étaient en raison inverse des longueurs des fils et en raison directe des sections. Fig. 666.

2234. La conductibilité des liquides était une donnée très Conducti-

bilité des liquides.

importante à établir lorsqu'on admettait la théorie de Volta sur la cause du développement de l'électricité. Plusieurs expériences ont été faites pour obtenir le coefficient de conductibilité de différents liquides ; on doit à M. Marianini une suite de recherches ayant pour but de déterminer le pouvoir conducteur de l'eau tenant en dissolution des acides, des alcalis ou des sels ; voici sa méthode d'observation. Lorsque l'on plonge dans l'eau de mer un couple voltaïque ordinaire en communication avec un multiplicateur, au moyen de deux fils de métal, et dans de l'eau un couple semblable, mais d'une surface cinq fois moindre, on obtient des déviations vingt fois plus grandes dans le premier cas que dans le second. Si l'on part du principe que les déviations sont proportionnelles aux conductibilités des liquides et aux surfaces des couples, le pouvoir conducteur de l'eau de mer sera 5 quand celui de l'eau distillée sera 1 ; ce rapport est précisément le même que celui qui a été trouvé par Cavendish. M. Marianini a employé ensuite des couples qui avaient à peu près la même surface, lorsqu'il a voulu comparer des conductibilités très différentes.

Cette méthode pèche essentiellement, parce que l'identité du courant doit varier avec l'identité de l'action chimique qui est là la cause vraiment importante à considérer. M. Matteucci, en intercalant dans un circuit des dissolutions renfermant 1/100 de différents corps, dans lesquelles le courant entrait et sortait par des fils de platine, a obtenu les résultats suivants.

	Déviation.		Déviation.
Eau distillée	2°	Acétate neutre de plomb	9°
Sulfate double de potasse et d'ammoniaque	4°,30'	Bi-oxalate de potasse	14
Chlorure de calcium	5	Sulfate de cuivre	20
Chlorure de potassium	5	Nitrate de mercure	35
Sulfate de magnésie	6	Nitrate d'argent	45
Sulfate neutre de fer	6	Acide oxalique	54
Chlorure de sodium	7	— tartrique	10
Nitrate de potasse	7	— hydrochlorique	10
Hydrochlorate d'ammoniaque	8	— sulfurique	8
		— nitrique	8
		Potasse	15
Chlorure de barium	9	Ammoniaque	8

Si on augmente la proportion de sel dissous, voici encore,

d'après M. Matteucci, les résultats qu'on observe : Avec le chlorure de potassium le maximum a lieu à 4/100, et la conductibilité reste constante jusqu'à la saturation; avec le chlorure de sodium le maximum de conductibilité a lieu à 1/100, elle reste constante jusqu'à 4/100, et diminue de 1/5 jusqu'à la saturation; avec l'acétate de plomb le maximum a lieu à 4/100, et diminue jusqu'à la saturation, ou elle est la même qu'à 1/200; avec le nitrate d'argent le maximum a lieu à 2/100 jusqu'à 4/100; l'acide sulfurique se comporte de la même manière. Lorsqu'une dissolution a atteint son maximum, l'addition d'un autre sel augmente la conductibilité, comme si le premier sel n'existait pas, à moins qu'il n'y ait précipitation d'un sel insoluble. Le chlorure d'iode, le proto-chlorure d'étain, et le chlorure de cuivre, ajoutés en quantités convenables à une dissolution de chlorure de sodium, ont offert une conductibilité presque métallique. Matteucci a également reconnu que la chaleur augmente la conductibilité des dissolutions salines, mais d'autant moins que la conductibilité est plus grande.

Tous les résultats qui précèdent sont précieux, mais ils n'indiquent point encore le rapport exact des conductibilités, ils ne conduisent qu'à reconnaître le sens de variation de la conductibilité.

M. Nobili a fait de nombreuses expériences pour reconnaître les lois de conductibilité des liquides pour l'électricité; voici les résultats généraux auxquels il est parvenu. Dans un circuit formé en partie par un canal plein de liquide, l'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit et dans tous les points d'une même section : c'est ce qu'on peut facilement reconnaître en plongeant dans le liquide, et à différentes profondeurs, deux fils de cuivre communiquant avec les extrémités d'un multiplicateur, maintenu à une distance fixe, et recouverts de vernis sur toute leur étendue excepté aux extrémités.

L'uniformité de distribution des courants dans la section du canal subsiste encore quand la section du canal devient plus grande ou plus petite; quand le canal est en partie seulement intercepté par une plaque métallique, la plus grande partie du courant se détourne pour éviter l'obstacle.

De la glace comparée à l'eau sous le rapport de la conductibilité.

2235. Depuis long-temps on savait que lorsqu'on interpose une légère plaque de glace dans le trajet d'un courant voltaïque sa transmission était arrêtée; en étudiant avec soin ces faits M. Faraday a vu que l'eau jouit de la propriété d'être conductrice de l'électricité pendant sa liquéfaction, et cesse de l'être pendant sa congélation; il a trouvé également cette même propriété dans les corps solides à la température ordinaire, mais facilement fusibles et dont la composition était telle que sous le rapport des actions électro-chimiques ils remplaçaient l'eau. La liquéfaction confère donc en général un pouvoir électrique très grand à la plupart des substances non métalliques ; l'eau paraît être, de tous les corps soumis jusqu'ici à l'expérience, celui dont le pouvoir acquis est le plus faible.

M. Faraday a reconnu que le pouvoir de l'eau est une centaine de fois moins fort que celui des différents oxides et des chlorures à l'état liquide; tout porte à croire que l'accroissement de pouvoir conducteur que reçoit l'eau, quand on y ajoute quelques petites quantités de sel, dépend du pouvoir conducteur de ces corps à l'état liquide.

Le pouvoir conducteur des composés étant intimement lié avec la propriété qu'ont ces corps d'être décomposés par la pile, on peut, en partant du principe précédent, soumettre à l'action décomposante de la pile, un grand nombre de corps sur lesquels on n'avait pu jusqu'ici faire agir l'électricité voltaïque. Nous citerons particulièrement les oxides, les chlorures, les cyanures, les sulfo-cyanures, les fluorures et certains composés vitreux. M. Faraday, en soumettant à l'action d'une pile de dix paires de disques le sel marin, le chlorure de magnésium, le borax, a obtenu le sodium, le magnésium et le bore.

§ III. *Théorie chimique de la pile.*

Variations des courants électro-chimiques.

2236. Avant d'exposer la théorie chimique de la pile telle que l'a donnée M. Delarive, nous allons examiner les modifications qu'éprouve l'électricité voltaïque dans son passage à travers des conducteurs liquides, interrompus par des lames métalliques. Nous avons vu précédemment que l'intensité du courant produit par une action chimique ne

dépend pas seulement de l'énergie de cette action ; car les fluides électriques séparés au moment de la combinaison se neutralisent presque complétement au lieu même où elle s'opère, en sorte que le multiplicateur ne donne passage qu'à la faible portion de l'électricité qui échappe à une recomposition immédiate. On comprend d'après cela que le plus ou moins de conductibilité des substances complétant le circuit, doit avoir une influence très marquée sur l'intensité du courant qui le parcourt. M. Delarive, étudiant cette cause de variation dans l'intensité des courants, a découvert des faits très remarquables ; il a pris une caisse contenant une solution de sel marin ou de chlorhydrate d'ammoniaque faisant partie d'un circuit voltaïque ; il a interposé une cloison de platine que le courant était obligé de traverser ; le galvanomètre indiquait que cette interposition diminuait l'énergie du courant, quoique le platine fût un corps meilleur conducteur que le liquide ; cette lame diminue donc la quantité d'électricité qui traverse le liquide ; si l'on interpose une seconde lame, il en passe encore moins : on doit conclure de là que l'électricité éprouve de la difficulté et une perte dans son passage d'un conducteur à un autre, comme la chaleur et la lumière. L'analogie devient plus frappante encore quand on observe que la perte faite par le courant, et mesurée à l'aide du galvanomètre, est moindre pour la seconde lame de platine que pour la première, moindre pour la troisième que pour la seconde ; ainsi l'électricité des courants surmonte plus facilement les résistances qui s'opposent à son mouvement lorsqu'elle a déjà surmonté des résistances analogues (1).

(1) M. Delarive a annoncé dernièrement (compte-rendu de la séance de l'Académie des sciences, mai 1841) que l'effet des diaphragmes métalliques interposés sur la route des courants dans le liquide qu'il parcourt, qui est si considérable pour diminuer son intensité quand ce courant est continu, devient nul ou à peu près nul quand le courant est discontinu et dirigé alternativement en sens contraire, au moyen d'un commutateur auquel on imprime un mouvement de rotation. Cette expérience fut répétée avec des diaphragmes de plusieurs espèces de métaux ; elle exige, pour réussir, une pile qui ait une tension assez forte ; elle prouve que la propriété qu'ont les diaphragmes de diminuer l'intensité du courant est due aux altérations chimiques que leurs surfaces éprouvent ; mais dès que le courant est discontinu, et dirigé alternativement en sens contraire, cha-

2237. Nous allons exposer maintenant la nouvelle théorie de la pile, qui, comme celle de Volta, est fondée sur un fait et un principe ; le fait est le développement de l'électricité dans toute action chimique; le principe consiste en ce que les tensions d'un fluide libre diffèrent de part et d'autre d'un obstacle à franchir ou d'une résistance à vaincre, la tension étant plus grande avant qu'après l'obstacle dans le sens où le fluide se meut.

Commençons d'abord par considérer une plaque de zinc plongée dans l'eau acidulée ; par suite de l'action chimique exercée sur le métal, le zinc prend comme nous l'avons vu l'électricité négative et la liqueur l'électricité positive; mais ces électricités se recombinent à travers le liquide, de sorte qu'un électroscope mis en contact avec la plaque de zinc ou le liquide ne donne que des signes peu sensibles d'électricité.

Mais si l'on plonge dans le même liquide une plaque de cuivre, et si on la met en contact avec la plaque de zinc par un fil métallique, les électricités développées sur le zinc et dans le liquide pourront le rejoindre par deux chemins, à travers le liquide, ou en parcourant le conducteur de cuivre ; une partie seulement de l'électricité suivra ce dernier chemin et produira un courant dans le conducteur. Ainsi le

cune des deux surfaces des diaphragmes éprouve alternativement deux actions chimiques contraires qui se détruisent, et alors rien n'arrête la transmission du courant. Aussi, plus ces courants discontinus et dirigés alternativement en sens contraire se succèdent rapidement, plus l'effet négatif des diaphragmes devient évident. On peut, en faisant usage de ce genre de courants, annuler complétement la perte d'intensité qu'éprouve l'électricité dynamique en passant d'un conducteur solide dans un liquide, et réciproquement, et on peut s'assurer de cette manière, contrairement à l'opinion reçue, que, dans bien des cas, les liquides conduisent mieux l'électricité que les métaux. M. Delarive a vu que de l'acide sulfurique étendu de neuf fois son poids d'eau, qui était moins bon conducteur qu'un fil de platine avec le courant continu, devenait au contraire meilleur avec le courant discontinu, et dirigé alternativement en sens contraire. Cette différence est due à ce que, dans le second cas, l'influence du passage de l'électricité du conducteur solide dans le liquide, et réciproquement du liquide dans le solide, est devenue nulle ou à peu près nulle, tandis qu'elle était très considérable dans le premier cas. Ainsi disparaît jusqu'à un certain point l'analogie qu'on avait cherché à établir par les expériences relatives à l'effet des diaphragmes entre le calorique et la lumière, d'une part, et l'électricité du mouvement, d'autre part.

courant augmentera avec l'étendue et le rapprochement de la plaque de cuivre et la conductibilité du conducteur. Considérons maintenant une pile dont tous les éléments sont égaux, par exemple, une pile à auge. Le liquide interpolaire étant de l'acide sulfurique étendu d'eau, il y aura autant de sources d'électricité dans l'appareil qu'il y a de surfaces planes de zinc; dans chaque case l'action chimique de l'acide sur le zinc qui forme une de ses parois donnera lieu à un dégagement d'électricité positive vers le liquide, et d'électricité négative vers le zinc. L'électricité positive conduite par le liquide et par la paroi cuivre, ira recomposer du fluide naturel avec le fluide négatif recueilli sur le zinc du couple suivant; l'électricité négative, conduite par le zinc et le cuivre, ira aussi recomposer du fluide naturel avec le fluide positif du liquide de la case précédente. Ainsi les électricités développées aux parois, attaquées des auges successives, se recombineront vers les parois qui ne le sont pas.

Il n'y aura que l'électricité positive répandue dans la dernière case liquide à une extrémité de la pile, et l'électricité négative refoulée sur le dernier couple à l'autre extrémité, qui pourront se recomposer immédiatement avec des fluides contraires voisins. Ces fluides s'accumulant aux pôles par la continuité de l'action chimique et acquérant ainsi des tensions de plus en plus grandes, il arrivera bientôt un moment où ces tensions et les attractions que ces masses de fluides contraires exerceront l'une sur l'autre, seront suffisantes pour vaincre toutes les résistances que la pile oppose à leur passage et à leur combinaison. A partir de cette époque, les tensions extrêmes conserveront des intensités constantes, et les nouvelles quantités de fluides contraires, toujours développées par les actions chimiques que nous supposerons constantes, se combineront, soit immédiatement, soit en traversant les différents couples qui composent la pile.

La théorie indique et l'expérience prouve que les cases extrêmes ne sont pas les seules qui doivent manifester de l'électricité libre, mais elle est de plus en plus petite à mesure que l'on considère les éléments de la pile de plus en plus éloignés d'un de ses pôles. Supposons maintenant que la pile soit isolée; chacune de ses deux moitiés sera électrisée de la

même manière que le pôle qui la termine, et le fluide correspondant aura une tension décroissant du pôle vers le milieu de la pile. Supposons maintenant que l'un des pôles soit en communication avec le sol, toute la pile sera chargée par le fluide libre accumulé au pôle opposé, et qui, tendant à s'écouler dans le sol, se répandra dans toutes les cases, et y manifestera une tension décroissante d'un pôle à l'autre, en quelque sorte proportionnelle, en chaque section, au nombre des obstacles offerts à l'électricité, et qui la séparent du sol. Lorsque le nombre des éléments d'une pile devient plus considérable, le nombre des obstacles que les fluides accumulés doivent surmonter pour se recombiner augmentant, les tensions extrêmes doivent atteindre plus tard leurs limites stationnaires, et conséquemment devenir plus grandes.

La tension aux pôles de la pile augmente dans une proportion moindre que le nombre des éléments. En effet, les fluides répandus à l'état de tension dans toute la pile proviennent de décompositions chimiques opérées dans les cases extrêmes; elles n'arrivent aux lieux qu'elles occupent qu'après avoir traversé toutes les cloisons précédentes, et elles sont conséquemment plus propres à vaincre de nouveaux obstacles de même nature pour se mettre en mouvement. Les tensions aux pôles d'une pile sont donc d'autant plus grandes que les résistances opposées au mouvement de l'électricité dans l'intérieur de l'appareil sont plus puissantes et plus nombreuses; c'est l'ensemble de ces résistances qu'on appelle la *conductibilité intérieure de la pile*. Le temps qu'un des pôles de la pile emploie à charger le condensateur, celui qu'une pile déchargée met à se recharger, doivent dépendre à la fois, et de la conductibilité intérieure de la pile, et de l'activité de l'action chimique, que nous considérons ici comme l'unique cause des phénomènes électriques que manifeste l'appareil.

La théorie qui précède montre très bien comment la tension croît avec le nombre des éléments, et comment les effets physiques ne dépendent que des dimensions des plaques.

§ IV. *Polarité électrique.*

Propriétés 2238. M. Delarive a fait l'observation intéressante que des

fils ou des lames métalliques, plongés dans une dissolution acide ou saline faisant partie d'un circuit voltaïque et où s'opèrent des décompositions chimiques, acquièrent dans ces circonstances des propriétés électriques particulières. Deux fils de platine ayant été plongés dans une dissolution saline et mis en communication pendant quelque temps avec les deux pôles d'une pile, si, interrompant cette communication, on attache ces fils, toujours immergés, aux deux bouts d'un galvanomètre, on observe un courant, dirigé en sens inverse de celui qui parcourait le circuit voltaïque; ce courant secondaire est d'autant plus fort et persiste d'autant plus long-temps que l'action chimique qui l'a précédé a été plus intense et plus long-temps prolongée. La faculté de produire un courant secondaire, ou ce qu'on appelle la *polarité électrique*, n'appartient qu'aux parties qui ont été immergées; car si l'on coupe ces parties et que l'on prenne toutes les précautions possibles pour que celles qui sont au-dessus soient dépourvues des corpuscules étrangers qui adhèrent ordinairement aux surfaces du corps, il n'y aura plus de courant secondaire quand on plongera dans la dissolution la partie non immergée des fils. L'intensité du courant secondaire varie en raison du temps pendant lequel les deux fils restent soumis à l'action de la pile et de la nature des conducteurs qui complètent le circuit.

particulières dont jouissent les lames métalliques plongées dans une dissolution faisant partie d'un circuit voltaïque.

M. Becquerel explique ainsi ce phénomène. On prend deux lames de platine dont les surfaces sont parfaitement nettes, de telle sorte qu'en les plongeant dans une solution saline neutre, et les mettant en rapport avec un multiplicateur, il n'y ait pas de courant; retirons les lames et mettons-les en contact, l'une avec la même solution, renfermant un millième de son poids d'acide nitrique, l'autre avec la même solution contenant un millième de son poids de potasse caustique; puis replongeons-les de nouveau dans la solution neutre, on aura alors un courant qui ira de la seconde à la première, en suivant le liquide, comme s'il y avait réaction de l'acide sur l'alcali. Cet effet est encore sensible en diminuant les quantités d'acide et d'alcali dans la solution saline. Or, quand deux lames de platine font partie d'un circuit voltaïque dans lequel se trouve une solution saline, qu'arrive-t-il? La surface de la lame positive se recouvre de

parties acides, et celle de la lame négative de parties alcalines; les deux lames se trouvent donc dans le même état que celles qui ont servi à l'expérimentation précédente; et comme l'effet électrique est le même, nous devons en conclure que la cause est semblable. Des conducteurs tout métalliques traversés par des courants les plus énergiques possibles ne donnent jamais lieu à des courants secondaires, lorsqu'on rompt le circuit pour y introduire un liquide. L'effet n'a donc lieu qu'autant que le circuit renferme un conducteur imparfait capable d'être décomposé. Cette circonstance prouve que l'action chimique joue le principale rôle dans la production du courant secondaire.

Pile secondaire de Ritter.

2239. En partant de l'explicatiou précédente on peut expliquer les effets des piles secondaires découvertes par Ritter. Ces piles sont formées de disques d'un seul métal alternant avec des rondelles de carton humectées d'un liquide conducteur. On prend, par exemple, des disques de cuivre et de carton humide, que l'on superpose les uns au-dessus des autres, en les alternant. Cette colonne est incapable par elle-même de se charger, si les surfaces des lames de cuivre sont parfaitement homogènes; mais si l'on met en communication pendant quelques instants ses deux extrémités avec les deux pôles d'une pile, elle prend une charge qu'elle conserve pendant assez de temps et qui est telle qu'il y a inversion dans les pôles, c'est-à-dire que le pôle positif de l'une correspond au pôle négatif de l'autre. Avec la pile secondaire on reproduit, quoiqu'à un moindre degré, tous les effets physiologiques et chimiques de la pile voltaïque.

Les effets des piles de Ritter s'expliquent ainsi suivant M. Becquerel. Les disques de cuivre de la colonne de Ritter soumis à l'action d'une pile voltaïque se trouvent dans le même cas, par rapport aux disques de carton mouillé, que le fil de platine qui est plongé dans une solution saline électrisée, par rapport à cette solution; dès lors les deux faces de chaque disque de cuivre doivent acquérir une polarité électrique contraire, par suite du transport des éléments acide et alcalin sur chacune d'elles, lesquels éléments transforment le disque en un véritable couple voltaïque; et comme tous les disques de cuivre se trouvent dans le même cas, il s'ensuit que la pile secondaire est une vérita-

ble pile voltaïque dont les deux éléments, au lieu d'être métalliques, sont, l'un acide, l'autre alcalin.

Pouvoir des métaux et d'autres substances pour opérer la combinaison des substances gazeuses.

2240. Nous venons de voir que des lames ou des fils métalliques qui ont acquis la polarité électrique par leur séjour dans un circuit voltaïque, possédaient des propriétés électriques; elles jouissent encore de la faculté d'opérer la combinaison des substances gazeuses. Pour faire comprendre les phénomènes qui en dépendent, il est nécessaire d'exposer brièvement les faits qui se rattachent à une découverte aussi curieuse que peu prévue, faite par Dœbernier. Ce chimiste a observé que le platine en éponge possède la propriété de déterminer à la température ordinaire la combinaison de l'hydrogène et de l'oxigène, et que le développement de chaleur qui en résultait suffisait pour rendre le métal incandescent. MM. Thénard et Dulong, en étudiant les circonstances de ce phénomène, ont observé les faits suivants : si l'on plonge un morceau d'éponge de platine dans un mélange d'oxigène et d'hydrogène, dans les proportions voulues pour former de l'eau, il y a détonation; si les proportions du mélange s'éloignent beaucoup de celle de l'eau, la combinaison s'effectue lentement; l'éponge fortement calcinée perd la propriété de devenir incandescente, mais conserve celle d'opérer lentement la combinaison des deux gaz; lorsque le platine est réduit en feuilles minces, l'action a lieu et avec d'autant plus de force que la lame est plus mince. D'autres métaux jouissent de la même propriété que le platine, en particulier ceux qui se trouvent combinés avec lui; l'or et l'argent en feuilles minces n'agissent qu'à des températures élevées. Les métaux ne sont pas les seuls corps qui jouissent de la propriété en question : le charbon, la pierre ponce, la porcelaine, le verre, le cristal de roche, à des températures moindres de 350°, se comportent comme l'éponge de platine.

Selon M. Faraday, pour faire acquérir à des lames de platine la puissance la plus forte, il faut les traiter d'abord à chaud avec la potasse caustique, ensuite avec l'acide sulfurique, puis les laver dans de l'eau distillée; l'or et le palladium se comportent comme le platine; l'argent et le cuivre ne montrent aucun effet aux températures ordinaires.

Jusque là les curieuses propriétés que possèdent les mé-

taux et les corps poreux, de favoriser dans de certaines conditions la combinaison des corps gazeux, n'avaient point été rattachées par des faits précis aux actions électriques ; c'est encore M. Faraday qui a fait une série d'expériences qui jettent un jour nouveau sur ces phénomènes. Il a été conduit à faire ces recherches en remarquant que les gaz qui résultaient de la décomposition de l'eau sous l'influence de la pile, disparaissaient peu à peu dans les tubes où on les recueillait. En effet, sous l'influence des lames de platine qui ont servi de pôle à la pile, la combinaison de l'oxigène et de l'hydrogène s'effectue. En soumettant à l'expérience la lame positive, M. Faraday a vu que le volume du gaz commence aussitôt à diminuer ; l'instrument s'échauffe assez pour faire entrer l'eau en ébullition. Le pouvoir des plaques positives, quoique diminuant graduellement, peut être conservé pendant un temps dont la durée dépend de certaines circonstances. En ajoutant dans les tubes où se trouvent les plaques une nouvelle portion de mélange détonant, on trouve que leur action continue pendant plus de 30 heures ; conservées dans des vases fermés, elles manifestent encore leur action 8 jours après, tandis que celles qui restent exposées à l'air libre la perdent en 12 heures.

Il paraît très vraisemblable, d'après cela, que l'on doit attribuer à un phénomène de polarité électrique l'origine de cette force d'attraction qui détermine la cohésion, les actions capillaires et les combinaisons chimiques. On peut admettre avec M. Faraday, que la sphère d'activité de cette force s'étend à des distances finies, quoique très petites, et que les gaz et les vapeurs qui se trouvent dans cette sphère sont condensés par la force dont il s'agit. On explique, de cette manière la précipitation de la vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère sur la surface des corps, tels que les substances hygrométriques et le verre, l'absorption des gaz par les corps poreux, tels que le charbon, la combinaison de deux gaz fortement condensés dans les pores de l'éponge de platine, sur les plis des feuilles de ce métal, autour de ces fils très minces. Enfin, on doit attribuer à la même force la propriété dont jouissent les lames métalliques de retenir à leur surface les particules acides ou alcalines, amenées par les courants voltaïques, et qui y adhèrent assez fortement pour conser-

ver à ces lames la polarité électrique dont nous avons décrit les effets, même après qu'elles ont été lavées, essuyées et chauffées au rouge.

2241. M. Becquerel a fait connaître un appareil très simple qui jouit de la propriété de donner naissance à un courant dont l'intensité ne varie pas sensiblement dans l'espace de vingt-quatre heures. Il est formé de deux petits bocaux en verre, dont l'un renferme de l'acide nitrique pur, et l'autre une solution de potasse caustique très concentrée; les deux bocaux communiquent ensemble au moyen d'un tube de verre recourbé, rempli d'argile très fine humectée d'une solution de sel marin. Dans le bocal où se trouve l'alcali, plonge une lame d'or, et dans l'autre une lame de platine. Si l'on met en communication avec le multiplicateur ces deux lames au moyen de fils d'or et de platine, on a un courant assez énergique qui provient de la réaction de l'acide sur l'eau, le sel marin et la potasse. La lame d'or prend à l'alcali l'électricité négative, et la lame de platine à l'acide l'électricité positive. Pile à courant constant de M. Becquerel.

Si l'on veut que le courant ait une intensité suffisante pour effectuer des décompositions chimiques, il faut donner à l'appareil une autre disposition. Les bocaux sont remplacés par des tubes de platine remplis d'argile fine, humectée d'un côté avec l'acide nitrique, de l'autre avec la solution de potasse; le tube de verre recourbé, contenant de l'argile et du sel marin, entre à frottement dans les tubes de platine, qui sont fermés à leurs autres extrémités par des couvercles perforés et garnis de coton pour retenir l'argile. Ces dernières extrémités sont plongées dans deux bocaux, contenant l'un l'acide nitrique, l'autre la solution de potasse caustique. Des crochets soudés sur les deux tubes de platine servent d'attaches aux fils de communication du circuit. Dans ces appareils, la lame qui touche l'acide est le pôle négatif; elle attire l'alcali du sel marin et celui du nitrate de potasse, lesquels se combinent immédiatement avec l'acide qui entoure cette lame; de l'autre côté les acides des sels décomposés sont attirés par la lame positive, et se combinent avec l'alcali qui l'environne.

Voici, d'après M. Becquerel, comment l'on peut se rendre compte de l'effet sensiblement constant de cet appareil;

on sait que les lames métalliques décomposantes faisant partie d'un circuit voltaïque et plongeant dans une solution se polarisent de manière à produire un courant dirigé en sens inverse du premier. La polarisation de chacune de ces lames consiste dans le dépôt des éléments transportés sur sa surface par le courant, et dont la nature dépend de la position de cette lame par rapport aux extrémités de la pile. Tant que ces éléments restent en contact avec la lame, il y a un courant dirigé en sens contraire du courant primitif; mais si la substance est entourée d'un liquide qui a une forte affinité pour elle, elle se combine avec lui, et la lame est aussitôt dépolarisée. C'est précisément ce qui arrive dans les différents éléments de la pile de M. Becquerel. L'art consiste donc, pour obtenir un courant constant, à dissoudre les dépôts à mesure qu'ils se forment.

De la polarité électrique que peuvent acquérir des métaux très oxidables.

2242. Le fer possède la propriété très remarquable de ne pas être attaqué par l'acide nitrique, dans lequel on le plonge quand on l'a mis au préalable dans un état particulier qui paraît évidemment se rattacher pour sa cause aux phénomènes que nous venons d'étudier. Lorsqu'on chauffe jusqu'au rouge une des extrémités d'un fil de fer, et qu'après son refroidissement on le plonge dans de l'acide nitrique d'une densité de 1,35°, cette extrémité n'éprouve aucune action, tandis que le même acide agit avec beaucoup d'énergie sur l'extrémité du fil de fer non échauffé. Un fil de fer oxidé peut servir à préserver un fil de fer qui ne l'est pas; non seulement l'action est nulle quand ils sont réunis, mais elle est encore nulle sur les deux quand ils sont séparés; le second fil peut servir à rendre indifférent un troisième fil, et ainsi de suite. Les expériences suivantes montrent comment les effets électro-chimiques interviennent dans ces phénomènes. Si l'on plonge un fil de fer en tout ou en partie dans de l'acide nitrique, et si, lorsque l'action est commencée, on le touche avec un fil de platine, l'action de l'acide sur le fer cesse aussitôt. La partie immergée devient brillante et n'éprouve aucun changement. L'effet est le même quand on substitue au platine un métal non oxidable, du charbon ou de la plombagine. Une petite surface de platine suffit pour annuler l'action de l'acide sur une large surface de fer. Il n'en est plus ainsi quand on touche le fer avec du

cuivre, du zinc, de l'étain, du bismuth, de l'antimoine ou du plomb; il est attaqué aussitôt.

Lorsque le fer est dans un état d'inaction, on peut le conserver un mois dans l'acide nitrique sans qu'il soit attaqué. Le fer inactif conserve sa propriété quand on le retire de l'acide, qu'on l'expose à l'air ou qu'on le plonge dans l'eau ou dans l'ammoniaque; il devient actif dès l'instant qu'on frotte sa surface. Voilà le résumé des faits observés. Pour les expliquer, MM. Faraday et Becquerel admettent que le fer inactif jouit de la même propriété que le platine qui a servi de réophore négatif, c'est-à-dire qu'une couche d'oxigène adhère à la surface du métal sans se combiner avec lui, et préserve ainsi le fer de l'action directe de l'acide nitrique.

2243. Comme les plaques de zinc amalgamé sont très employées dans la construction d'une pile à courant constant, qui est généralement adoptée dans les expériences de physique, nous allons faire connaître leurs principales propriétés. Une plaque amalgamée possède la singulière propriété de ne pas être attaquée par de l'eau légèrement acidulée par l'acide sulfurique dans laquelle elle plonge; mais si l'on vient à la toucher avec un fil de cuivre ou de platine, l'action devient vive aussitôt, le zinc se dissout et l'hydrogène se dégage sur le fil, qui est le pôle négatif du couple voltaïque. On considère, et avec raison, cet effet comme étant une anomalie, attendu que le mercure, constituant par son contact sur le zinc et l'eau acidulée un couple voltaïque, le zinc devrait être plus attaqué que lorsqu'il ne lui est pas associé; or, le contraire ayant lieu, il faut que les particules de zinc, par suite de leur contact suivi de combinaison avec le mercure, se trouvent dans le même état que les particules du fer inactif, comme M. Faraday l'a avancé. **Propriétés du zinc amalgamé.**

Si on plonge dans une dissolution d'une partie d'acide sulfurique et de 30 parties d'eau une plaque de zinc ordinaire, elle est attaquée énergiquement. M. Delarive a démontré que dans les mêmes circonstances le zinc pur ne l'était pas d'une manière sensible. On peut penser que dans le premier cas toute l'action provient de petits couples voltaïques formés de zinc et d'autres métaux qui sont contenus dans le zinc impur, et qui peuvent être le fer, le cuivre, le cadmium, l'arsenic, etc. Il résulte de cette multiplicité d'actions qu'il y a **Inactivité du zinc pur et du zinc amalgamé.**

beaucoup de zinc détruit, et que l'hydrogène se dégage en apparence sur la surface du zinc; tandis que ce dégagement n'a lieu réellement qu'à la surface des particules étrangères. Le zinc amalgamé, quoique impur, ne décompose pas sensiblement l'eau acidulée; il conserve néanmoins une telle affinité pour l'oxigène qu'il suffit du plus léger contact avec un métal pour faire naître une vive effervescence. M. Faraday pense que, dans cette circonstance, le mercure agit en amenant la surface dans une condition uniforme, qui détruit l'action de ces petits couples voltaïques. Toute la surface du zinc étant recouverte, on conçoit qu'une partie ne puisse agir comme déchargeur vis-à-vis d'une autre; il en résulte que tout le pouvoir chimique de l'eau à la surface est dans cette condition d'égalité qui, quoique tendant à produire un courant électrique à travers le liquide sur une autre plaque de métal, ne présente pas d'irrégularités au moyen desquelles une partie ayant des affinités plus faibles pour l'oxigène, puisse agir comme déchargeur vis-à-vis d'une autre.

Deux conséquences importantes résultent de l'amalgamation du zinc; la première est que l'équivalent complet d'électricité s'obtient par l'oxidation d'une certaine quantité de zinc; la seconde, qu'une batterie construite avec du zinc ainsi préparé, et chargée avec une dissolution d'acide sulfurique, n'est pas altérée, du moins le zinc, tant que les électrodes ne sont pas unis.

Pile à courant constant de Daniell. 2244. On sait que, pour obtenir des courants constants, il est nécessaire de mettre le zinc et le cuivre dans une case particulière, de séparer les deux cases par une membrane transmettant les courants, et de mettre dans chacune d'elles un liquide capable d'empêcher le dépôt des produits secondaires sur les lames. Voici les dispositions que M. Daniell a adoptées pour construire sa pile à courant constant: La fig. 667 représente la coupe d'une cellule dont la réunion au nombre de dix constitue la batterie (fig. 668). *a b c d* est un cylindre de cuivre de 16 centimètres de haut et de 10 centimètres de large; il est ouvert à sa partie supérieure *a b*, et fermé à sa base, à l'exception d'une partie *ef* de 4 centimètres de large, destinée à recevoir un morceau de liége auquel est adapté un tube de verre à siphon *g h i j k*; au sommet *a b*, deux supports horizontaux soutiennent un goulot de cuivre

(Marge : Fig. 667. — Fig. 668.)

correspondant avec celui du bas. Avant de mettre en place le liége à travers lequel passe le tube à siphon ; on fait passer par le col inférieur *e f* un tube membraneux, formé avec une partie d'estomac de bœuf, et l'on attache un fil retors à l'ouverture supérieure *l m n o*. Il résulte de cet arrangement une cavité intérieure, communiquant avec le tube à siphon, de telle manière que, lorsqu'on le remplit d'un liquide jusqu'au niveau *o m*, la moindre addition de liquide le fait couler par l'ouverture *k*. Il peut donc s'échapper par là autant de gouttes qu'il en arrive par en haut. *p q* est une lame de zinc fondu amalgamé, de 16 centimètres de haut et 14 millimètres de large ; elle est supportée sur le bord de l'ouverture supérieure par une planche de bois *r s*, passant par un trou foré à son extrémité supérieure ; *t* et *u* sont des coupes remplies de mercure destinées à établir la communication avec les différentes cellules au moyen de fils métalliques. Dans la fig. 668 les dix cellules sont réunies en simples séries ; le zinc de l'une communique avec le cuivre de la suivante, et ainsi de suite.

Au moyen des dispositions précédentes, la lame de zinc étant suspendue dans la cellule membraneuse intérieure, où le liquide actif tombe lentement par l'entonnoir supérieur, tandis que la même dissolution, plus pesante, qui se forme sort en même proportion par le tube à siphon, l'action peut marcher continûment d'une manière égale. On remplace l'eau acidulée par une solution saturée de sulfate de cuivre ; le courant circule lentement, et le cuivre réduit par l'hydrogène se précipite sur le cylindre de cuivre. Pour éviter l'affaiblissement de la solution de sulfate de cuivre, on suspend des cristaux de ce sel dans un tamis de cuivre perforé. Dans l'élément de cette pile, le tube membraneux joue un rôle important, car il s'oppose au mélange des liquides différents qui baignent ses deux surfaces et transmet les courants électriques, sans opérer une décomposition locale, comme le ferait une cloison métallique. Lorsque l'on introduit dans le circuit d'une pile, construite d'après les principes précédents, un appareil où l'eau soit décomposée, il s'y développe toujours des quantités égales de gaz dans des temps égaux. Toutefois, dans les premiers moments de la mise en activité de la pile, son effet est un peu plus élevé, ce qui tient à ce

que le liquide des cellules membraneuses éprouve alors une variation dans sa composition. En effet, ce liquide doit employer un certain temps, avant de se charger de la quantité de sulfate de zinc, qui y existe toujours lorsque l'appareil est régularisé; et si l'on suspend l'action de la pile, ce sel, durant le chômage, se distribue d'une manière différente dans les cellules; il faut donc un certain temps, lorsqu'on referme le circuit, pour remettre les couches liquides dans leur état de composition normal. La variation primitive de l'effet est d'ailleurs très faible, et ne dure jamais plus d'une heure, même dans le cas le plus défavorable; la fixité s'établit ensuite.

Supériorité du platine sur le cuivre dans la pile à cloison.

2245. M. Jacobi a communiqué à l'Académie des sciences, en décembre 1840, par l'intermédiaire de M. Demidoff, une note relative à la comparaison de la force de deux différents couples voltaïques à cloison, l'un cuivre-zinc, chargé de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique étendu de six parties d'eau en volume; l'autre, platine-zinc, chargé d'acide nitrique concentré et du même acide sulfurique étendu. Ce physicien a conclu de l'expérience et du calcul qu'il ne faut qu'une pile de 3 mètres carrés de platine pour remplacer une pile de 50 mètres carrés de cuivre. On pourrait croire, d'après cette conclusion, que dans les piles en général le platine ait une grande supériorité sur le cuivre pour transmettre une grande quantité d'électricité. Mais cette supériorité d'effets ne tient, dans le cas présent, selon M. Becquerel, qu'à la réaction de l'acide nitrique concentré sur l'eau acidulée par l'acide sulfurique, qui donne naissance à un courant électrique beaucoup plus considérable que celui résultant de la réaction de la dissolution de sulfate de cuivre sur la même eau acidulée; en outre, l'acide nitrique étant décomposé par l'action réunie de deux courants, il en résulte une augmentation dans l'effet général par suite d'une plus grande quantité de zinc oxidé. A ces diverses causes sont dus les effets signalés par M. Jacobi, effets qu'on aurait obtenus en substituant au platine un autre métal de même surface et non attaquable par l'acide nitrique. Mais il faut dire qu'aucun métal n'est plus convenable que le platine, et que la remarque de M. Jacobi est très intéressante sous le rapport pratique.

2246. M. Grove a fait plusieurs expériences pour chercher à expliquer l'inactivité du zinc amalgamé, et il a conclu que l'inaction du zinc amalgamé était l'effet d'une polarisation qui diffère des autres cas de polarisation en ce que l'élement transporté, au lieu d'être précipité sur le métal négatif, entrait en combinaison avec lui et rendait ainsi ce métal tellement positif que le courant était anéanti, tandis que dans les autres cas il est seulement diminué d'intensité; mais pour adopter cette explication il faut admettre que le mercure, sous l'influence d'un courant voltaïque, peut absorber une petite quantité d'hydrogène qui se dégage aussitôt que la communication est rompue. *Explication de l'inactivité du zinc amalgamé.*

§ V. *Des décompositions électro-chimiques.*

2247. Dès qu'on eut découvert la propriété dont jouit la pile, d'opérer la décomposition d'un liquide au moyen de deux lames de platine qui terminent les deux extrémités de la pile, on donna le nom de pôles à ces lames, celui de pôle positif à celui où se rendaient l'oxigène et les acides, et celui de pôle négatif à celui où se rendaient l'hydrogène et les bases; mais cette dénomination est impropre : elle ne présente à l'esprit que de fausses analogies. Pour obvier à cet inconvénient, Ampère donna le nom de *réophores* (porte-courants) à ces portions de conducteurs soudées aux extrémités de la pile. Dès qu'on eut soupçonné une origine électrique aux actions chimiques, les corps transportés au réophore positif furent appelés *électro-négatifs*, et les corps transportés au réophore négatif, *électro-positifs*, par suite du principe qu'il y a attraction entre deux corps chargés d'électricité contraire. *De la nomenclature électro-chimique.* *Réophores.*

En partant du principe que la force déterminante qui opère la décomposition n'existe pas aux pôles, mais bien dans les corps décomposés, M. Faraday a considéré les pôles, ou réophores, comme des portes par lesquelles le courant électrique débouche dans les corps décomposés, et il les a nommés *électrodes*. Il donne le nom d'*électrolytes* aux corps dont les éléments sont séparés par les électrodes : l'acide chlorhydrique est un corps électrolytique, et l'acide borique *Électrodes. Électrolytes.*

ne l'est pas, attendu que les deux éléments du premier sont séparés, tandis que ceux du second ne le sont pas.

Anode. Catode. M. Faraday, désirant avoir une mesure naturelle de la direction électrique, a cherché cette mesure dans la terre. Si le magnétisme de la terre est dû à des courants électriques circulant autour d'elle, ces derniers doivent être dirigés constamment de l'est à l'ouest; or, si dans certains cas de décomposition chimique le corps décomposé est placé de manière à ce que le courant qui le traverse ait la même direction et soit parallèle à celui qu'on suppose exister dans la terre, alors les surfaces par lesquelles passe l'électricité auront un rapport invariable et montreront toujours la même relation de pouvoir. M. Faraday propose en conséquence d'appeler l'électrode qui est tourné vers l'est, *anode*, ἀνὰ en haut, ὁδὸς chemin, route par où s'élève le soleil, et celle vers l'ouest, *catode*, κατὰ en bas, ὁδὸς, route par où le soleil disparaît. L'anode est donc la surface par laquelle entre le courant électrique; c'est celle où se montrent l'oxigène, le chlore et les acides. La catode est la surface où le courant abandonne le corps décomposé; c'est celle où se développent l'hydrogène, les corps combustibles, les métaux, etc.

M. Faraday a conclu d'un grand nombre d'expériences que la décomposition électro-chimique ne dépend pas de l'action simultanée des deux électrodes, puisqu'en ne se servant que d'un seul électrode la décomposition s'effectue, et que l'un des éléments mis en liberté passe à l'électrode directement en action, que cet électrode soit le positif ou le négatif; tandis que l'autre élément se réfugie vers l'autre extrémité du corps soumis à la décomposition, quand bien même ce corps serait terminé par l'air.

Condition générale des décompositions électro-chimiques. 2248. On a remarqué depuis long-temps que les éléments qui sont combinés avec le plus d'énergie sont aussi ceux qui sont décomposés avec le plus de force par le courant; et que les corps qui sont combinés en vertu de faibles affinités sont ceux qui obéissent le moins à l'action décomposante de l'électricité. On peut donc dire que tous les corps composés se séparent, sous l'influence d'un courant électrique, avec une facilité proportionnée à la force de l'affinité qui unit leurs éléments. Parmi les corps qui résistent à l'ac-

tion décomposante de l'électricité, on doit distinguer d'abord l'acide borique, ensuite les iodures de soufre, les chlorures de soufre, de phosphore et de carbone; les chlorures d'antimoine, l'acide acétique cristallisé, l'ammoniaque, les acides sulfurique, arsénique et nitrique privés d'eau. Il est probable que le défaut de décomposition dans ces corps tient à l'absence du pouvoir conducteur. La dépendance entre la faculté décomposante et la faculté conductrice est telle que les corps non conducteurs à l'état solide, qui le deviennent à l'état liquide, sont alors décomposés.

2249. Nous allons décrire rapidement les appareils que M. Faraday a imaginés pour mesurer l'électricité voltaïque, et auxquels il a donné le nom d'*électromètre de Volta*. Leur construction repose sur ce principe, que l'action chimique décomposante d'un courant est constante pour une quantité constante d'électricité, malgré les variations qui peuvent avoir lieu dans son intensité, dans la dimension des fils ou plaques employés, et la nature des corps conducteurs ou non conducteurs à travers lesquels elle passe. L'eau acidulée par l'acide sulfurique étant facilement décomposable, est le liquide le plus convenable pour servir d'indicateur. On doit éviter avec soin la recombinaison des gaz dégagés, laquelle s'effectue, comme nous l'avons dit précédemment, sous l'influence de la lame positive. La forme des appareils décomposants varie selon le genre d'expériences que l'on a en vue. Le premier consiste en tubes droits, gradués, contenant chacun une plaque et un fil de platine soudés avec de l'or, et fixés par la fusion à l'extrémité fermée du tube (fig. 669). Ces tubes ont une longueur d'environ 25 centimètres, et un diamètre de 18 millimètres. Les plaques de platine sont aussi larges que possible et placées très près de l'orifice du tube. Quand les expériences exigent quelques jours de durée, et lorsqu'il s'agit de rassembler de grandes quantités de gaz, M. Faraday emploie un électromètre d'une disposition particulière.

Électromètre de Volta.

Fig. 669. Fig. 670.

2250. Nous voyons donc en résumé que l'électromètre de Volta, lorsqu'il fait partie d'un circuit voltaïque, peut servir à mesurer le pouvoir chimique d'un courant, par la mesure de la quantité de chacun des gaz qui s'y développent par suite de la décomposition de l'eau. Nous allons maintenant

Pouvoir chimique d'un courant.

exposer les résultats remarquables auxquels est parvenu M. Faraday. Si l'on introduit dans le même circuit voltaïque, et à la suite les uns des autres, plusieurs électromètres semblables, dont les lames métalliques ont diverses dimensions et qui contiennent des liquides différents, le courant unique qui parcourt tous ces électromètres décompose dans tous la même quantité d'eau ou y développe les mêmes quantités de gaz. Si trois de ces appareils sont tellement disposés dans le circuit, que le courant total, après avoir parcouru l'un d'eux, se partage entre les deux autres, et se reforme au-delà, il arrive toujours que la somme des quantités d'eau décomposées par les deux courants dérivés est égale à la quantité décomposée dans le premier électromètre. Ainsi la faculté d'opérer des décompositions chimiques, que possède un courant hydro-électrique, reste la même dans toutes les parties du circuit, et se partage entre les courants dérivés absolument comme l'intensité. On peut donc regarder comme démontré que le pouvoir chimique d'un courant est proportionnel à la quantité d'électricité en mouvement dans le circuit.

Équivalents électro-chimiques.

2251. Ce premier principe étant admis, il va en découler les conséquences les plus importantes. En effet, le pouvoir chimique du courant voltaïque étant une force constante et comparable, si dans un même circuit on introduit un électromètre et un appareil analogue dans lequel un autre corps que l'eau soit décomposé, ce sera la même quantité absolue d'électricité en mouvement qui développera les gaz dans l'électromètre, et qui séparera les éléments du corps composé dans le second appareil. Par exemple, lorsque ce nouveau corps est du protochlorure d'étain, qui ne renferme pas d'eau, l'étain recueilli au bout d'un certain temps pesant 3 gr. 2, le poids de l'eau décomposée, pendant le même temps est 0 gr. 497. Ces nombres sont donc des équivalents électro-chimiques ; c'est-à-dire que la quantité absolue d'électricité en mouvement dans un courant électrique capable de décomposer 0 gr. 497 d'eau, est aussi celle qui est nécessaire pour précipiter 3 gr. 2 d'étain du protochlorure de ce métal.

Ces nombres sont à très peu près dans le même rapport que les équivalents chimiques de l'eau et de l'étain. Par des

expériences analogues à la précédente, M. Faraday a obtenu les équivalents électro-chimiques d'un grand nombre de corps, et ces équivalents sont exactement proportionnels aux poids des atomes de ces corps, adoptés par les chimistes. Or, comme un courant électrique opérant une décomposition ne fait que restituer aux composants les masses d'électricités contraires qui sont mises en liberté lors de leur combinaison, l'identité précédente conduit à cette loi, que *les atomes de tous les corps simples possèdent les mêmes quantités absolues d'électricité*.

M. Faraday a une si grande foi dans l'exactitude de la loi que nous venons d'énoncer, qu'il n'hésite point à diminuer de suite les équivalents chimiques de plusieurs corps tels qu'ils sont admis généralement. Il paraît également convaincu que le pouvoir qui gouverne les décompositions électriques et les attractions chimiques est le même, et il a une telle confiance dans l'influence qui régit les lois naturelles qui rendent définie la décomposition électrique, qu'il n'hésite pas à croire que les attractions chimiques doivent y être soumises également.

Il est peu d'expérimentateurs qui jusqu'ici aient contrôlé les beaux résultats de M. Faraday. Nous devons cependant en excepter M. Becquerel, qui a soumis à une persévérante investigation toutes les parties pour ainsi dire de la science de l'électricité. Pour vérifier la loi des équivalents électro-chimiques, il a employé une pile à courant constant de deux couples. Trois dissolutions, l'une de cuivre, l'autre d'argent, la troisième de zinc, furent successivement introduites dans le circuit pendant 24 heures chacune. Un électromètre particulier mesurait l'intensité constante du courant, et des changements dans la longueur des fils de communication permettaient de régler cette intensité, de telle sorte qu'elle fût la même dans les trois cas. Les quantités de cuivre, d'argent et de zinc précipitées dans des temps égaux, pesaient respectivement 0 gr. 009, 0 gr. 0305, 0 gr. 00912, et ces nombres sont précisément proportionnels aux poids atomiques des trois métaux.

2252. Les expériences de M. Faraday nous ont montré qu'il faut une quantité considérable d'électricité en mouvement pour décomposer une petite proportion d'un composé; Quantité d'électricité nécessaire pour décomposer



un gramme d'eau.

il a montré par exemple qu'un poids de 0 gr. 065 d'eau exige pour sa décomposition un courant électrique continu pendant 3′45″, qui soit capable de maintenir à la chaleur rouge dans le même temps un fil de platine d'un quart de millimètre de diamètre. M. Pouillet a donné une évaluation plus précise; il prend pour unité la quantité d'électricité en mouvement qui traverse dans une minute de temps une section d'un circuit thermo-électrique bismuth et cuivre, dont la puissance conductrice est égale à celle d'un fil de 20 mètres de long et de 1 millimètre de diamètre, lorsque la différence de température des deux soudures est de 100°; et il conclut par le calcul de plusieurs expériences, que 13787 unités de cette espèce sont nécessaires pour décomposer 1 gramme d'eau.

Recherches de M. Matteucci sur le pouvoir chimique des courants.

2253. M. Matteucci a démontré qu'en employant une pile composée d'un certain nombre d'éléments, le courant acquiert toujours une force électro-chimique d'autant plus grande que la quantité d'électricité dégagée et mise en circulation est plus considérable, et qu'il arrive qu'une augmentation de surface du métal dissous n'a pas toujours pour effet la circulation d'une plus grande quantité d'électricité; tandis que cette circulation peut devenir plus considérable par un changement dans le liquide qui provoque le courant sans que pour cela la quantité totale d'électricité dégagée se soit accrue. L'appareil dont il fait usage consiste en un flacon de la contenance de 125 à 150 grammes d'eau, muni d'un bouchon de liége recouvert de vernis. Une lame de zinc distillé de 3 centimètres sur 4, et une autre de platine de mêmes dimensions sont soudées à deux fils de cuivre traversant le bouchon. Ces deux fils, qui sortent du flacon, sont scellés dans le bouchon et recouverts de vernis jusqu'à la soudure. Au centre du bouchon se trouve un tube de verre de 3 millimètres de diamètre, recourbé en U, et dont l'une des branches communique avec l'intérieur, et l'autre avec l'extérieur. Au moyen de cette disposition, quand il se dégage du gaz dans l'intérieur, ce gaz déplace une portion du liquide, qui, étant recueillie et mesurée, indique la quantité de gaz dégagée. Le liquide employé pour charger les appareils voltaïques est de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Il a reconnu que dans une pile la quantité d'électricité dégagée,

et qui circule dans chaque couple, augmente ordinairement avec le nombre des couples. Si l'on apporte un changement dans la distance entre les électrodes, dans leur étendue, la nature du liquide, il y a aussitôt un changement correspondant dans la quantité de l'électricité dégagée, et qui circule entre chaque couple. Ce changement est indiqué par la quantité d'hydrogène dégagée sur la lame de platine de la pile.

M. Matteucci, en examinant les phénomènes de décomposition voltaïque opérés simultanément sur deux combinaisons mêlées ensemble, est arrivé à établir le principe suivant : l'action chimique du courant est toujours définie ; les deux combinaisons sont décomposées directement par le courant ; la quantité de chacune d'elles, qui est décomposée, est équivalente à celle qu'on obtient en en décomposant séparément une seule par un courant de même force. Enfin, toutes les fois qu'en augmentant la force chimique de la pile, on voit augmenter la quantité décomposée d'une certaine combinaison comparativement à une autre avec laquelle elle se trouve mêlée, on doit en conclure que la première est moins décomposable que la seconde. C'est ainsi que l'iodure de potassium, les acides hydriodique et hydro-chlorique, les chlorures, l'eau acidulée par l'acide sulfurique, sont des combinaisons qui se suivent dans l'ordre de leur facilité à être décomposées.

En examinant le rapport qui existe entre l'action d'un courant et le nombre relatif des équivalents chimiques qui entrent dans la combinaison décomposée, il est arrivé aux conséquences suivantes : 1° si un courant électrique décompose dans le même temps trois combinaisons mises séparément sur sa route, dont la première renferme deux équivalents, la deuxième un équivalent avec deux équivalents, la troisième un équivalent avec trois équivalents, on trouve que son action chimique sur chacune d'elles, mesurée par la quantité de ces trois combinaisons qui ont été décomposées, varie comme les nombres 1, 1/2, 1/6 ; 2° si l'action chimique du courant, comme tout le démontre, est toujours proportionnelle au degré d'affinité des éléments qui sont séparés par ce courant, on doit en conclure que les degrés d'affinité qui lient les deux éléments dans ces trois composés de 1 à 1, de 1 à 2, et de 2 à 3, sont comme les nombres 1, 1/2,

1/6 ; 3° les composés qui renferment un équivalent combiné avec 4, ne conduisent pas le courant et ne se laissent pas décomposer.

§ VI. *Principales applications de l'électro-chimie.*

2254. L'électro-chimie est une branche de la science toute nouvelle, et cependant ses applications sont déjà aussi nombreuses qu'importantes. Nous allons indiquer ici les principales.

Moyens de préserver le doublage en cuivre des vaisseaux de l'action de l'eau de mer.

H. Davy est le premier qui ait fait des expériences sur l'application de l'électro-chimie à la conservation du doublage de cuivre des vaisseaux. L'eau de mer, sous l'influence de l'oxigène de l'air, agit sur le cuivre; il est oxidé et détruit. Davy a imaginé, pour prévenir cette oxidation, de composer le doublage de deux métaux, de cuivre et de zinc, de telle manière que le cuivre qui en forme la plus grande partie doive se désoxider, comme formant le pôle négatif d'une sorte de pile, ou d'un circuit voltaïque, composé de ce métal, du zinc plus attaquable, et de l'eau de mer. Davy trouva qu'un morceau de zinc, gros comme un pois, suffisait pour garantir un mètre de cuivre, et cela en quelque endroit qu'il fût placé. Si l'on compare le doublage des bâtiments protégés à celui des bâtiments semblables qui ne le sont pas, on trouve que la surface du premier est brillante, tandis que celle du second éprouve une corrosion rapide; celle-ci devient d'abord rouge, ensuite verte, et perd une partie de sa substance en écailles. L'emploi du zinc ou de la fonte offre un moyen très simple de préserver de toute altération le doublage en cuivre des vaisseaux; mais on devait s'attendre à un inconvénient grave que nous allons signaler et qui résulte de l'action chimique du couple voltaïque sur les substances dissoutes dans l'eau de mer. On ne tarda pas à s'apercevoir qu'il se déposait des substances alcalines et terreuses sur le cuivre négatif. En mer, les feuilles de cuivre préservées des bâtiments se sont recouvertes de carbonates de chaux et de magnésie ; des plantes et des polypiers s'y sont aussitôt rassemblés ; dès lors le poids des bâtiments a été augmenté et leur marche ralentie. Davy, pour parer à cet inconvénient majeur, a fait diverses expériences, d'après

lesquelles il a cru devoir conclure que des feuilles de cuivre défendues par des surfaces de fonte ou de zinc dans la proportion de 1/150, ne se chargeaient pas de matières alcalines, et que les plantes n'y adhéraient pas.

Des expériences nombreuses ont démontré, sauf quelques exceptions, que le doublage en bronze avait un avantage marqué sur le doublage en cuivre. On a observé que l'altération des métaux qui servaient au doublage des vaisseaux commençait sur les arêtes dans les parties des lames qui avaient été pliées; dans ces parties les molécules ont été mises dans un état forcé, la cohésion est moins grande; dès lors elles sont plus accessibles à l'influence des agents extérieurs, et comme les portions environnantes sont moins attaquées, il en résulte une foule de couples voltaïques dont l'action augmente l'énergie des altérations.

Nous allons maintenant étudier quelques applications industrielles de l'électro-chimie qui ont acquis et doivent acquérir une grande importance; nous devons surtout mentionner le procédé de dorure sur métaux de M. de la Rive, le procédé galvanoplastique de Jacobi, et l'électrotype de M. Bocquillon. Ces belles applications reposent complétement sur les principes qui ont été mis en pratique dans la pile à courant constant de Daniell. (2244)

Procédé électro-chimique pour dorer l'argent et le laiton.

2255. La dorure sur laiton et sur argent se fait en général, comme on sait, par l'intermédiaire du mercure. M. de la Rive a eu l'idée d'employer l'influence du courant électrique pour dorer les métaux. Ce courant, en décomposant une solution d'or, doit amener l'or métallique, molécule par molécule, sur le métal qui sert de pôle négatif, et peut le dorer intérieurement en faisant pénétrer l'or dans sa surface. Les premières tentatives avaient été infructueuses; mais, guidé par les recherches de M. Becquerel sur l'action des faibles courants électriques pour obtenir les décompositions chimiques, et sur l'observation de faits qu'on a remarqués en se servant de diaphragmes membraneux pour séparer les dissolutions traversées successivement par le même courant, M. de la Rive adopta le procédé suivant. On place l'objet à dorer, argent ou laiton, dans une dissolution d'or très étendue, qui est elle-même renfermée dans une espèce de sac cylindrique fait de baudruche ou de vessie. Il faut avoir soin de remplir

d'eau, avant de s'en servir, le cylindre de vessie ou de baudruche, afin de bien l'humecter et de rendre ses parties bien flexibles, et de s'assurer aussi qu'il n'a aucun trou, quelque petit qu'il soit, par où le liquide pourrait s'écouler. Quand on a introduit la dissolution d'or dans le sac de vessie, on place à son tour ce dernier dans un bocal de verre plein d'eau acidulée par quelques gouttes d'acide sulfurique ou nitrique; dans cette dissolution plonge une lame de zinc, à laquelle on peut donner la forme d'un cylindre creux qui entoure la vessie cylindrique. Cette lame de zinc communique par un fil métallique avec l'objet à dorer, et l'on a ainsi un couple dans lequel cet objet joue le rôle de métal négatif. Le faible courant auquel ce couple donne naissance suffit pour décomposer la dissolution d'or; l'or se porte sur le métal qui plonge dans cette dissolution, et le zinc se dissout dans l'eau légèrement acidulée, sans qu'il y ait mélange entre les deux liquides, grâce au diaphragme de baudruche. Dans bien des cas, on a mis l'eau acidulée dans l'intérieur du sac en vessie, et la dissolution d'or en dehors; un cylindre solide en zinc plonge dans l'eau acidulée, et l'objet à dorer est placé extérieurement dans la dissolution d'or. C'est le moyen, en particulier, qui a été employé pour dorer l'intérieur d'une coupe d'argent, qui sert alors elle même de bocal. On commence par y placer le sac en vessie rempli de la dissolution acide dans laquelle le zinc est immergé; puis on remplit l'espace vide compris entre l'extérieur de la vessie et la partie intérieure du vase, par la dissolution d'or, et on établit enfin la communication métallique entre le zinc et le vase à dorer. Le procédé qu'on vient de décrire a été mis en usage pour dorer de l'argent et du laiton.

Pour dorer le fer, il faut, au préalable, le couvrir d'une couche de cuivre ou d'argent. Les objets de formes compliquées, tels que cuillers à café, cuvette de montre, ont reçu une dorure très uniforme sur tous les points de la surface immergée. Les frais de dorure pour chaque cuillère, non compris la main-d'œuvre, ne paraissent pas dépasser 40 cent.

Procédé galvano-plastique de M. Jacobi.

2256. M. Jacobi soumit d'abord à l'action des courants électriques des plaques sur lesquelles des figures ou des caractères étaient tracés, et la décomposition du sulfate de cuivre lui procura des dépôts de ce métal qui vinrent adhérer aux planches gravées et offrirent en relief l'empreinte exacte

du dessin gravé en creux sur l'original. Pendant long-temps, il est vrai, il n'obtint que des fragments cassants et d'une fragilité extrême ; mais au demeurant, le phénomène de ces formations singulières n'en fut pas moins constaté. Il découvrit bien vite qu'il ne devait demander des résultats complets de la galvanoplastie qu'à des batteries électriques à courant constant ou à cloison. Depuis ce temps il s'occupa beaucoup à donner une disposition convenable à l'admirable instrument de Danniell ; c'est là en effet le principal mérite de l'application de M. Jacobi. C'est une conséquence de faits établis depuis long-temps que le cuivre réduit s'attache en état cohérent, non seulement à une surface du même métal, mais aussi à des surfaces d'or, d'argent, de platine, etc. Le fer et le zinc, de même que l'étain pur, n'ont pas la même propriété attractive, parce que ces métaux décomposent le sulfate de cuivre spontanément et avec trop de promptitude. Les alliages de plomb et d'étain, le plomb lui-même, se trouvant très rapprochés du cuivre par rapport à leur force électro-motrice, ne sont attaqués que très faiblement par les solutions du cuivre, de sorte qu'on en peut faire des moules pour des copies galvaniques. S'il s'agit de reproduire des traits purs et déliés, le plomb sans alliage est préférable, surtout s'il n'est pas décapé.

M. Jacobi fit graver des caractères sur une plaque de plomb ; il la soumit au procédé galvanique et en tira une plaque de cuivre d'une parfaite cohérence, sur laquelle se trouva l'empreinte exacte en relief de l'original. Par ce succès, le champ d'application se trouve élargi, l'art de l'imprimerie, la stéréotypie, et une quantité d'industries utiles peuvent en tirer partie. Dans le premier essai, l'objet à copier formait l'élément négatif d'un couple voltaïque, les deux liquides étant séparés par une plaque de terre glaise faiblement cuite. Pour obtenir une plaque de cuivre galvanique parfaitement cohérent et maléable, il faut que la solution de cuivre soit préparée à chaud, pure et bien saturée. Pour obtenir l'état cohérent du cuivre, c'est moins la force du courant qu'il faut considérer que le degré de saturation de chaque point du liquide qui entre en contact avec un point de la plaque positive. La malléabilité du cuivre galvanique est d'autant plus grande que l'énergie de l'action est moindre : sa couleur est alors d'un bel incarnat, pâle et d'un

brillant presque argentin. Si la couleur apparaît sale, plus foncée et enfin brune, c'est un indice que la solution n'était pas assez saturée et que le cuivre produit est cassant. Pour détacher de l'original la plaque de cuivre galvanique, il faut qu'elle ait acquis une épaisseur convenable; mais si le cuivre de l'original est cassant, lamelleux ou spongieux, s'il n'est pas suffisamment décapé ou poli, il arrive quelquefois qu'il y a une adhésion si forte entre les deux surfaces, que leur séparation devient impossible. En général, les métaux différents ne sont point sujets à cet inconvénient.

M. Jacobi s'aperçut bien vite des inconvénients de cette manière de procéder; il la changea totalement lorsqu'il eut découvert qu'on peut produire des plaques de cuivre cohérent par la décomposition des solutions de cuivre entre des électrodes du même métal, en n'employant qu'un seul couple voltaïque. L'anode se dissout, et la réduction a lieu à la surface de la cathode. De cette façon, on peut séparer entièrement du couple voltaïque, qui engendre l'action, l'appareil dans lequel s'opère l'empreinte galvanique.

Sans ces perfectionnements, l'application de la galvanoplastie serait restée enfermée dans des limites trop étroites; mais, par leur moyen, le procédé même est devenu beaucoup plus simple, le succès plus assuré, et l'espace de temps dans lequel les résultats peuvent être obtenus beaucoup plus abrégé. Mais ce qui est d'une plus haute importance, c'est qu'il n'y a plus de limite quant à la dimension et à la configuration des objets à reproduire. M. Jacobi en a donné une idée en rapportant qu'il lui a fallu seulement cinq à six jours pour achever un bas-relief galvanique de $0^{m},420$ de long sur $0^{m},283$ de large, et pesant $0^{k},911$, de sorte que 182 grammes de cuivre environ se sont trouvés réduits par chaque espace de vingt-quatre heures. Pour obtenir ce résultat, M. Jacobi n'a employé qu'un seul couple à cloison de $1^{m},199$ carré, chargé de sulfate de cuivre et d'une faible solution de sulfate de soude. Cet appareil est d'une constance admirable, pourvu qu'on ne néglige pas de suppléer à la diminution du sulfate de cuivre qui a lieu par la cristallisation.

En partant du principe que le galvanisme n'agit que sur la surface des objets présentés, on devait penser que des substances quelconques, convenablement recouvertes d'une couche métallique et munies d'un conducteur, pourraient

servir comme cathode dans l'appareil réducteur. Ayant pris une tablette de cuivre, M. Jacobi y grava des caractères avec une pointe; puis l'ayant saupoudrée de cuivre en poudre impalpable, il la soumit au procédé galvanique; au bout de quelque temps, il en obtint une plaque de cuivre cohérent sur laquelle les caractères gravés en creux sur la pièce ressortaient en relief. L'état de ténuité auquel on peut amener le graphite, qui est un électromoteur au moins aussi parfait que le cuivre, le rend propre à former un enduit infiniment mince, quoique toujours cohérent. De cette manière on a pu obtenir des empreintes galvaniques en cuivre en prenant des moules de cire, de bois, de plâtre et de stéarine.

Pour faire comprendre toute la perfection du procédé de M. Jacobi, nous allons, d'après M. Alexandre Demidoff, auteur d'une notice dont nous avons extrait tout ce qui précède, rapporter une très remarquable expérience. Ayant pris une plaque métallique sur laquelle se trouvait un image photogénique, produite par le daguerréotype, M. Jacobi s'en servit comme de moule dans l'appareil où s'opère la réduction galvanique du cuivre. L'action engendrée par un couple voltaïque ayant été entretenue pendant vingt-quatre heures, il en résulta une feuille de cuivre galvanique d'un poli parfait, sur laquelle se retrouva l'empreinte assez distincte de l'image photogénique; seulement les ombres et les lumières s'y trouvaient retracés à rebours. M. Fizeau a présenté à l'Académie des sciences, le 24 mai 1841, des contre-épreuves d'images daguerriennes d'une grande perfection obtenues au moyen de procédés galvano-plastiques, sans altération apparente de l'image originale. Il a annoncé qu'on pouvait obtenir un bon nombre d'épreuves d'une même planche.

Électrotype de M. Bocquillon.

2257. En partant des mêmes principes que M. Jacobi, M. Bocquillon a fait construire un appareil très simple, qu'il nomme électrotype, au moyen duquel on peut reproduire en cuivre le fac-simile exact d'une médaille, d'un bas-relief métallique, d'une gravure en taille-douce ou en relief. Voici d'après l'auteur la description de l'appareil et les conditions de l'opération. Si l'original à reproduire est en cuivre ou en argent, on le recouvre d'une couche très mince de plombagine en poudre très fine, qu'on y promène quelque temps, à l'aide d'un pinceau de blaireau à poils un peu courts. On entoure les rebords de la pièce A d'un bourrelet de cire à mo- Fig. 671.

deler, et on la fixe sur la plaque B au moyen de ce bourrelet, avec cette condition indispensable que le revers bien propre de la médaille touche métalliquement la plaque B, également bien décapée.

Pour être bien certain de ce résultat, quand il s'agit d'une médaille, on peut placer quelques épaisseurs de feuilles d'étain touchant à la fois la plaque B et le centre de la médaille; de sorte que la cire qui s'introduirait accidentellement sous les rebords de celle-ci ne détruirait pas le contact métallique. Enfin on recouvre d'une couche épaisse de vernis tout le reste de la plaque B, ainsi que le fil de cuivre CC qui y est soudé, moins l'extrémité de celui-ci.

On place la plaque B au fond du vase DD, on introduit l'extrémité du fil CC dans le trou E du support F et on l'y serre avec sa vis. On place alors le diaphragme GG dans le vase D, et, sur le trou du diaphragme, le cylindre HH dont le fond II est perméable. On introduit ensuite le disque de zinc J dans le cylindre H, puis le fil de cuivre KK, qui y est soudé, dans le trou L du support F, et on l'y serre également avec la vis.

Il est nécessaire de mettre l'extrémité des fils C et K bien à vif, ainsi que les parois des trous E et L; on y parvient en frottant les fils avec du papier à l'émeri, et en passant de temps en temps un équarrissoir dans les trous. Il est encore mieux d'amalgamer les fils et les trous avec du nitrate de mercure. Il faut enfin obtenir le contact métallique le plus parfait possible entre les trous et les fils.

On a préparé d'avance une dissolution saturée de sulfate de cuivre. On remplit le vase D du liquide, ainsi préparé, à quelques millimètres au-dessus du diaphragme G; puis le cylindre H, jusqu'au-dessus du disque de zinc J, d'une eau faiblement acidulée, dans laquelle on a fait dissoudre une pincée de sulfate de soude. Enfin on dispose, sur le diaphragme G, autour du cylindre H, quelques cristaux de sulfate de cuivre dont la dissolution entretient la saturation du liquide à mesure de la décomposition du sulfate, dont le cuivre se dépose sur la pièce A, tandis que son acide, traversant la paroi perméable I, va attaquer le zinc.

Tous les deux jours on change le liquide du cylindre H; mais, l'opération une fois commencée, on peut se borner à y mettre de l'eau pure, et au nettoyage du disque de zinc

qui, en se dissolvant, se recouvre d'une couche de cuivre en poudre.

On peut alors enlever le diaphragme G, et retirer la pièce A du liquide, pour juger la couleur du dépôt; mais il faut le faire rapidement, parce que la présence de l'air oxiderait légèrement la surface du dépôt, ce qui empêcherait l'adhérence de la couche déjà formée avec le dépôt suivant. On remet en place toutes les pièces de l'appareil, et on laisse continuer l'opération jusqu'à ce qu'on juge le dépôt suffisamment épais pour pouvoir être détaché sans se rompre.

La couleur rose pâle est celle du meilleur cuivre; elle passe au brun sale si on laisse à l'air le cuivre encore mouillé du sulfate de cuivre. Quand cet accident arrive, il faut décaper la surface avec de l'acide nitrique étendu, jusqu'à ce que la couleur rose soit revenue, laver rapidement à grande eau, et replacer promptement la pièce dans le bain de sulfate de cuivre.

Si le dépôt est naturellement d'un brun sale, c'est que le bain de sulfate n'est pas assez concentré, ou que le contact métallique n'est pas suffisamment établi, soit entre la pièce A et la plaque B, soit entre les fils conjonctifs et le support F, ou enfin que le liquide du cylindre est trop faiblement acidulé ou salé; on n'a alors qu'un dépôt friable, sans adhérence et presque pulvérulent.

Si la perméabilité du fond I du cylindre H est trop grande, l'opération se fait trop rapidement, et le cuivre déposé est également pulvérulent. On y remédie en éloignant le disque de zinc J de cette cloison pour augmenter la distance entre le zinc et la pièce A.

Lorsqu'on ne veut qu'un dépôt très peu épais, on détache la pièce A de la plaque *b*; on la lave à grande eau; puis, à la lime, on enlève le métal qui s'est formé en trop autour de la pièce; on la fait chauffer du côté du dépôt sur une lampe à alcool, et lorsqu'en y jetant une goutte d'eau, elle bouillonne rapidement et avec bruit, on plonge la pièce dans l'eau froide. On en détache le dépôt en frappant derrière la pièce avec le manche d'un marteau, et, s'il est nécessaire, en faisant quelques pesées entre l'original et le dépôt avec la lame d'un couteau.

Le chauffage du dépôt a pour résultat de rendre le cuivre beaucoup plus malléable. Il resterait cassant si l'on n'y avait

pas recours; mais le chauffage aussi altère son éclat métallique.

Le dépôt ainsi obtenu est la contre-épreuve de l'original. On reproduit l'original lui-même en traitant la contre-épreuve de la même manière.

On peut avoir directement un *fac simile* de l'original en enfonçant celui-ci dans du plomb dont la surface est pure de toute oxidation, ou en prenant un cliché à la manière des fondeurs en caractères, et en traitant ces clichés comme il a été expliqué plus haut. Dans ce cas l'emploi de la plombagine est tout-à-fait inutile (1).

Pour la première fois, dit M. Jacobi, le galvanisme va franchir la limite des cabinets des observateurs et s'introduire dans les ateliers des artisans et des artistes. La galvano-plastie est un premier pas dans l'étude de cet agent mystérieux, mais puissant, qui est appelé à un rôle si important dans le monde industriel, soit comme moteur, soit comme producteur d'éclairage, et qui trouvera encore une foule d'autres applications dès que les esprits pratiques se seront familiarisés avec elle. L'introduction dans la vie sociale d'un nouvel agent est une époque historique. Galvani, ou plutôt Volta, sera le Prométhée des temps modernes.

Télégraphes électriques. 2258. Depuis long-temps déjà on a conçu l'espérance d'employer les moyens électriques pour transmettre les signaux au loin; mais les premiers essais laissaient beaucoup à désirer. Ainsi Reiser imagina de se servir d'autant de fils qu'il y a de lettres dans l'alphabet, et de transmettre chaque lettre au moyen d'une étincelle partant d'un fil qui lui correspond. Sœmmering, au lieu de l'étincelle, observait la décomposition qui s'effectuait dans chaque fil. Mais aussitôt qu'Oersted fit sa grande découverte de l'action révolutive exercée par un courant électrique sur l'aiguille aimantée, Ampère fut un des premiers qui proposa, d'après La Place, d'employer l'action électro-magnétique d'autant de circuits qu'il y avait de lettres, sur des aiguilles aimantées. Un grand nombre de physiciens ont cherché depuis à mettre en pratique cette même idée.

Wheastone a proposé et appliqué sur une distance de

(1) L'électrotype de M. Bocquillon se trouve chez M. Lerebours, opticien, près le Pont-Neuf, à Paris.

20 milles un procédé qui repose sur les principes suivants : cinq fils conducteurs agissant sur cinq aiguilles différentes et interposées entre deux stations éloignées, suffisent pour transmettre instantément les différentes lettres de l'alphabet, au nombre environ de trente par minute. Il est possible même de transmettre deux lettres à la fois et de recevoir des communications en même temps qu'on en donne, sans faire aucun changement à l'appareil. A chaque station éloignée se trouve un observateur ayant devant lui un appareil muni d'autant de touches qu'il y a de lettres dans l'alphabet. Dès l'instant qu'il met le doigt sur une des touches, le caractère qui y correspond est mis en jeu immédiatement, et la touche correspondante à l'autre station est mise immédiatement en mouvement, en raison de la vitesse excessive de l'électricité.

La théorie des lois de l'induction a conduit M. Gauss à un procédé d'après lequel, depuis deux ans, une chaîne simple sert avec le succès le plus complet pour transmettre rapidement des mots. Voici son procédé : le principal appareil est un conducteur composé de 7,000 tours d'un fil de cuivre recouvert de soie, de la longueur de 23,000 mètres ; en retirant rapidement cet appareil du double barreau magnétique placé dans son intérieur, et le remettant de suite dans sa position précédente, sans le retourner, on obtient dans le fil deux courants successifs dirigés en sens contraires, qui réagissent immédiatement sur l'aiguille aimantée. Les effets produits ont été combinés de manière à transmettre sept lettres dans une minute. A la suite des deux actions en sens contraire que reçoit l'aiguille, celle-ci n'étant pas à l'état de repos, il pourrait se faire qu'après un grand nombre de signaux elle fût fortement déviée de sa position d'équilibre ; dans ce cas les signaux pourraient perdre de leur précision. M. Gauss, pour parer à cet inconvénient, a fait usage d'un appareil qu'il appelle *calmeur*, et dont l'effet consiste à détruire en très peu de temps des oscillations qui dureraient quelques heures et dont les amplitudes décroîtraient très lentement. Les grandes oscillations cessent alors entièrement en peu de minutes. De plus, un commutateur est disposé pour changer momentanément la direction du courant ou l'interrompre ; par ce moyen on peut transmettre des phrases.

On le voit, c'est encore un art dans l'enfance ; mais nous

manquons encore de documents précis pour juger de la valeur comparative des divers moyens proposés. Il n'est pas douteux que les télégraphes électriques pourront être beaucoup plus facilement établis quand les travaux des chemins de fer seront plus avancés, car le point difficile est d'établir commodément des conducteurs suffisamment isolés et préservés de la destruction.

Combinaisons chimiques produites par des actions lentes.

2259. M. Becquerel a fait un grand nombre d'expériences dans le but d'utiliser les phénomènes électro-chimiques, en les affaiblissant de manière à leur faire opérer lentement des combinaisons nouvelles, quant à leur nature ou à leur forme, ou à reproduire plusieurs combinaisons naturelles qu'on n'avait pu préparer par les moyens ordinaires de la chimie à l'état de cristallisation. Ainsi, par exemple, si on place dans un tube recourbé en U ou dans deux vases communiquant ensemble, mais séparés par une couche d'argile humectée, deux liquides susceptibles de réagir l'un sur l'autre, et si d'autre part on réunit les deux liquides par un même fil métallique, les deux dissolutions communiqueront peu à peu à travers la couche d'argile, et cette action lente a fourni à M. Becquerel du sulfate de chaux, du carbonate de chaux et du sulfate de baryte, régulièrement cristallisés en petit, comme on les trouve dans la nature.

Si on prend pour liquide deux dissolutions, l'une de sel marin, l'autre d'un sel de cuivre, et pour conducteur un fil de cuivre, on obtient, comme l'a vu M. Becquerel, des cristaux très nets de chlorure double de cuivre et de sodium; enfin, par des procédés analogues on peut obtenir un grand nombre de composés sous des formes cristallines régulières Les recherches de M. Becquerel ont rendu très vraisemblable l'hypothèse qui consiste à admettre que la plupart des substances cristallines qui composent l'écorce du globe ont été formées par des procédés analogues. Ce même physicien, partant de ces données et cherchant à opérer des phénomènes inverses, est parvenu à extraire au moyen de procédés électro-chimiques les métaux précieux des minerais de plomb, de cuivre, d'argent, etc. Il est probable que lorsque ces moyens électro-chimiques seront perfectionnés, on pourra les appliquer avantageusement à l'exploitation des mines.

CHAPITRE VII.

DE L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE DANS SES RAPPORTS AVEC LA PHYSIOLOGIE.

2260. La partie de la physique qui s'occupe de l'électricité dynamique dans ses rapports avec la physiologie peut être envisagée sous deux points de vue principaux. 1° On doit rechercher l'influence de l'électricité sur les êtres organisés; 2° on doit étudier également les conditions dans lesquelles il se développe des courants électriques chez les mêmes êtres. Nous allons successivement aborder les faits les plus saillants que la science possède sur les rapports du galvanisme à la physiologie.

§ I. *Influence de l'électricité dynamique sur les êtres organisés.*

Action des courants électriques sur les animaux nouvellement tués.

Depuis l'époque où Galvani démontra que le courant de deux métaux hétérogènes en communication avec les muscles et les nerfs d'une grenouille suffit pour la faire contracter, on a varié à l'infini les expériences électro-physiologiques dans l'espoir de découvrir la cause qui entretient la vie dans les corps organisés.

Je dois rappeler les expériences remarquables du docteur Ure, sur un pendu immédiatement après l'exécution. La moitié de la première vertèbre cervicale ayant été enlevée, on mit à nu la moelle épinière, puis on fit une incision à la hanche gauche, afin de rendre visible le nerf sciatique. Un des conducteurs de la pile fut mis en contact avec la moelle épinière, tandis que l'autre conducteur fut appliqué sur le nerf sciatique. A l'instant même tous les muscles du corps furent agités de mouvements convulsifs. Le côté gauche fut plus vivement affecté que les autres parties, chaque fois que l'on établissait la communication. En faisant mouvoir le second conducteur de la hanche au talon, le genou ayant

été plié préalablement, la jambe fut lancée avec tant de violence qu'elle faillit renverser un des assistants qui essayait en vain d'en prévenir l'extension.

Le nerf sus-orbital ayant été découvert, fut mis en communication avec l'un des conducteurs, et l'autre conducteur fut placé au talon; tous les muscles de la face furent mis simultanément en action d'une manière effroyable. Toutes les fois que l'on promenait l'un des fils, comme dans l'expérience précédente, les grimaces étaient si extraordinaires que des spectateurs furent forcés de quitter l'appartement à cause de leur effroi et de leur malaise; un d'eux perdit même connaissance.

Les expériences de Ure furent variées par plusieurs physiciens physiologistes, et entre autres par Aldini; tous observèrent que l'on pouvait produire des mouvements plus ou moins marqués lorsque différentes parties du corps d'un homme mort depuis peu étaient placées dans un circuit voltaïque. Les résultats varient selon l'âge et la température.

Action d'un courant électrique faible sur la langue.

2261. Une des plus anciennes expériences galvaniques est celle de Sulzer, rapportée dans un petit ouvrage imprimé en 1767, et intitulé *Théorie du plaisir*. Une pièce de zinc et une pièce de cuivre étant mises en contact avec la suface de la langue, on éprouve, au moment où les métaux se touchent, une saveur plus ou moins marquée. En se servant du galvanomètre pour les mettre en communication, on reconnaît l'existence d'un courant qui fait dévier fortement l'aiguille; par l'action de la salive sur le zinc, ce métal s'électrise résineusement, tandis que la langue prend l'électricité vitrée; les deux fluides se réunissent ensuite par l'intermédiaire du cuivre et du fil du galvanomètre. Au lieu de cuivre et de zinc, on peut employer dans cette expérience deux pièces du même métal; on ne perçoit plus alors de saveur; mais le galvanomètre, plus sensible dans ce cas que l'organe, fait reconnaître un courant, pourvu que les surfaces métalliques en contact avec la salive soient assez inégales.

Action du courant électrique sur les nerfs.

2262. La grenouille convenablement préparée, c'est-à-dire ayant des nerfs à nu et complétement isolés, est encore un des instruments les plus délicats pour reconnaître l'existence des courants, dont elle peut même indiquer le sens dans cer-

tains cas. Si l'on fait passer un courant à travers l'épaisseur du nerf d'une cuisse de grenouille préparée, on observera de violentes contractions L'effet aura lieu, quelque rapprochés que soient les pôles ; une ligature empêchera tout effet, pourvu qu'elle soit placée entre la patte et le trajet du courant. *Haller* avait déjà remarqué que de tous les stimulus de l'irritabilité il n'en est pas de plus puissant que l'étincelle électrique, qu'on sait maintenant être un courant instantané. Mais les courants continus, comme l'expérience le prouve, ont aussi une grande influence. Cette action si remarquable du courant sur les nerfs reste encore sans explication. M. Person a montré qu'il n'est nullement nécessaire, pour qu'elle ait lieu, que le courant suive le nerf dans toute sa longueur et parcoure ses ramifications. Cette manière de voir est une hypothèse tout-à-fait gratuite ; si l'on s'en tient aux résultats de l'expérience, on reconnaîtra qu'un nerf, soit pendant la vie, soit après la mort, pendant la période de l'irritabilité, est dans une condition telle, que tout ce qui change d'une certaine manière la position relative de ses molécules peut occasionner une sensation ou un mouvement : ainsi l'action du courant électrique doit être provisoirement assimilée à celle des stimulus mécaniques ou chimiques.

Les muscles de la vie organique qui se contractent spontanément après la mort continuent à se contracter lors même que le courant n'agit plus sur eux. Voici une expérience due à M. *de Humboldt*, et qui met bien ce fait en évidence. Le cœur d'une carpe était tellement affaibli, qu'on n'y observait plus qu'une pulsation en quatre minutes, et toutes les irritations mécaniques n'y occasionnaient pas la moindre accélération. On le soumit à l'action d'un courant, puis on l'abandonna à lui-même. Les pulsations se manifestèrent de la manière suivante :

Dans la 1re minute,	35 pulsations.
2e	31
3e	23
4e	12
5e	3.

Une seconde application du courant porta le nombre des pulsations à 25 par minute. Ces expériences réussissent par-

ticulièrement sur des poissons. Cependant M. *de Humboldt* a obtenu des effets analogues sur un renard, sur deux lapins et sur un rat. *Fowler* a également changé les pulsations du cœur dans les animaux à sang chaud.

Suivant M. Matteucci, en comparant l'action du courant à celle des stimulants pour produire les contractions, on trouve les différences suivantes : 1° avec le courant électrique, il y a une séparation bien tranchée entre les phénomènes de contraction, suivant la direction du courant dans le nerf ; pour les stimulants ordinaires, ces deux effets sont simultanés ; 2° le courant électrique persiste bien plus longtemps à produire les contractions et les sensations que les stimulants ; 3° le repos ou l'action d'un courant électrique dirigé en sens contraire du premier, peut rétablir l'activité d'un nerf, ce que ne font point les autres stimulants ; 4° les poisons, comme l'acide prussique, la morphine, détruisent l'activité du nerf pour les stimulants, et non pour les courants ; 5° le courant électrique, suivant sa direction, produit des contractions ou des sensations, lorsqu'il cesse d'agir, et rien de semblable n'a lieu avec les stimulants.

Un courant qui détermine de violentes contractions quand il agit sur un nerf, n'occasionne que des mouvements fibrillaires s'il passe seulement par le muscle. Voici comme M. Person a prouvé ce fait important. On dispose une cuisse de grenouille de manière que le nerf touche une pièce de zinc Z, tandis que la patte est en contact avec une pièce de cuivre (fig. 672). L'action chimique des chairs humides sur le zinc donne lieu à une décomposition d'électricité, le zinc devient résineux, et la substance animale prend l'électricité vitrée. Si l'on fait communiquer les deux métaux avec un arc métallique M, il s'établit un courant dans le sens marqué par les flèches, ainsi qu'on peut s'en assurer en se servant du galvanomètre pour établir la communication. On voit que le courant est forcé de passer par le nerf qui est isolé ; aussi les contractions sont-elles très fortes. Mais si le zinc est en contact immédiat avec les muscles de l'extrémité de la cuisse, le courant ne sera plus forcé de suivre le nerf qui est engagé dans les chairs, et on observera à peine quelques contractions fibrillaires. Cependant le courant sera plus fort dans ce second cas, comme on peut s'en assurer avec le

Expériences de M. Person.

Fig 672.

galvanomètre, et comme cela doit être, puisque la surface de zinc attaquée est plus étendue.

Les muscles organiques font exception à la proposition : ainsi un courant qu'on fait agir sur le cœur produit toujours le même effet, quels que soient les points par lesquels il est appliqué, et *Fowler* n'a pas observé que les pulsations fussent beaucoup plus fortes ou plus fréquentes lorsqu'il agissait sur les nerfs pneumo-gastrique et grand sympathique.

M. Person a démontré par beaucoup de faits directs que le névrilème est incapable d'isoler les courants les plus faibles qu'on puisse produire dans les expériences galvaniques, de sorte qu'un courant engagé dans un nerf, au lieu de suivre ses ramifications, passe dans les muscles dès que ceux-ci lui offrent un chemin plus court.

Les métaux sont pour l'électricité des conducteurs beaucoup meilleurs que les nerfs; ceux-ci ne conduisent pas mieux que les muscles, et leur conductibilité est sensiblement indépendante de leur organisation.

Puisque la différence de conductibilité entre les nerfs et les muscles est sensiblement nulle, et que le névrilème ne peut pas retenir les courants engagés dans les nerfs, il s'ensuit que le passage de l'électricité à travers un membre ou un organe complexe doit être fort irrégulier : aussi, dans les expériences de M. *Wilson Philip*, où la digestion paraît avoir été entretenue par l'électricité après la section de la huitième paire, ce serait une erreur que de se représenter le courant suivant régulièrement les nerfs. Cette observation s'applique à une foule d'autres expériences qu'on expliquait en admettant gratuitement que l'électricité parcourait les ramifications nerveuses. Tous les tissus sont traversés à peu près indistinctement; mais il suffit qu'un nerf soit affecté en un point pour que l'effet se propage dans toute sa longueur.

M. Becquerel a objecté à ces conséquences, que M. Person a tiré de son travail, que le nerf dans l'état de vie possède peut-être un pouvoir conducteur propre qui lui vient de son organisation et qui lui permet de transmettre l'électricité suivant la volonté de l'individu.

M. Person a encore démontré qu'un courant, quelles que soient sa direction et son intensité, n'occasionne plus de contraction quand il est établi d'une manière invariable.

Il faut de grandes précautions pour obtenir un courant vraiment invariable. On atteint ce but en amenant le courant par les pôles d'une pile à courant constant et en établissant les communications au moyen du mercure : alors on constate que tout effet cesse après une ou deux convulsions; seulement les contractions peuvent se reproduire au moment où l'on interrompt le circuit, quel que soit le sens du courant; mais il faut que celui-ci soit très intense, ou que l'irritabilité soit très grande. Voici comme M. Person dispose l'expérience qui établit cette importante proposition. On prépare
Fig. 673. une cuisse de grenouille, en isolant le nerf (fig. 673), on la pose sur une plaque de verre; on applique le pôle vitré en A et le pôle résineux en B ou sur la patte elle-même : le courant marche alors dans le sens de la flèche supérieure, c'est-à-dire dans le sens des ramifications du nerf, ce qui ne veut pas dire qu'il les suive. Dans cette disposition, nous dirons que le courant est *direct*. Si on renverse les pôles, c'est-à-dire si on met en A le pôle résineux, et en B, ou sur la patte, le pôle vitré, le courant ira dans le sens de la flèche inférieure, ou en sens inverse des ramifications, et nous dirons qu'il est inverse. L'expérience prouve que dans toutes ces dispositions il y a des convulsions au moment où le contact a lieu et au moment où il cesse; mais l'intensité des contractions n'est pas la même dans tous les cas; elle suit une loi très régulière, qui a été indiquée par *Nobili*.

COURANT DIRECT, *ou dans le sens des ramifications.*	COURANT INVERSE, *ou en sens inverse des ramifications.*
4. A l'établissement du circuit, contractions fortes.	1. A l'établissement du circuit, contractions faibles.
2. A la rupture du circuit, contractions faibles.	3. A la rupture du circuit, contractions fortes.

A mesure que l'irritabilité diminue et que l'on emploie un courant moins fort, les contractions indiquées cessent d'avoir lieu; les plus faibles disparaissent les premières, et dans l'ordre indiqué par les chiffres. Cette loi peut se trouver en défaut dans deux cas : 1° quand les organes ont été soumis antérieurement à des courants prolongés; 2° quand l'animal est vivant. Dans ce dernier cas, les contractions

peuvent manquer, parce que la volonté contre-balance jusqu'à un certain point l'effet du courant; il suffit alors d'employer un courant plus énergique : on s'assure, du reste, que l'exception est due à la volonté, parce qu'elle n'a plus lieu si on agit sur le membre séparé de l'animal.

Généralement un courant direct ne produit de contraction qu'au moment où il s'établit, et un courant inverse n'en occasionne qu'au moment où il cesse. La contraction, quand le courant inverse cesse, étant constante et beaucoup plus forte que celle qui a lieu à la cessation du courant direct, elle a frappé depuis long-temps les observateurs. *Volta* et *Fowler* sont les premiers qui l'aient notée en la désignant sous le nom de *secousse secondaire*, mais ils n'ont pas observé la relation avec le sens du courant; c'est à *Lehot* et à *Belinghieri*, de Turin, qu'on doit cette découverte.

Voici comment M. Person démontre la proposition précédente. On prépare une cuisse de grenouille en isolant le nerf sciatique depuis son origine jusqu'au genou. On la pose sur une plaque de verre, et avec les pôles d'une pile d'un seul couple on établit des courants, soit dans un sens, soit dans l'autre (fig. 674). Par exemple, le pôle vitré étant en A, et le pôle résineux en B, le courant est direct, et la secousse a lieu au moment où l'on établit le contact; au contraire, le pôle résineux étant toujours en B, si le pôle vitré est en A′, le courant est inverse. Il n'y a pas de secousse quand le contact s'établit, mais il en a une quand il cesse. Fig. 674.

2263. M. Marianini, en étudiant sur un animal vivant l'action du courant, suivant qu'il chemine dans le sens des ramifications nerveuses ou dans la direction opposée, a reconnu que le courant direct produit des mouvements et le courant inverse des sensations. Pour le démontrer, on prend une grenouille préparée de manière que les membres inférieurs unis ensemble ne soient attachés au corps que par les nerfs récurrents mis à nu; l'animal n'est ni écorché ni décapité, et les viscères restent intacts. Les membres inférieurs sont placés dans une tasse remplie d'eau, où aboutit le pôle négatif d'une pile composée de quelques éléments seulement, et les jambes de devant dans un liquide communiquant avec le pôle positif, de telle sorte que la tête et la poitrine de la grenouille sont appuyées sur le bord des deux vases. En fermant le cir-

Le courant direct produit des mouvements; le courant inverse, des sensations.

cuit, les membres inférieurs de la grenouille se contractent sans donner aucun signe de souffrance, quoiqu'elle reste exposée à l'action du courant pendant vingt minutes. Si l'on dirige le courant d'une manière inverse, elle s'agite, mais moins que la première fois, respire péniblement, se gonfle beaucoup, et même se met à coasser; elle donne enfin tous les signes qui annoncent la douleur et la souffrance.

Pour réussir complétement et ne pas faire contracter l'animal avec le courant inverse, à l'instant où l'on ferme le circuit, il faut employer un appareil composé de quelques éléments seulement; car si le courant a de l'énergie, il surmonte les obstacles qui s'opposaient à la manifestation des contractions; c'est ce que M. Person a prouvé de la manière suivante. Une grenouille ayant été fixée sur une planche de liége, il isola le nerf sciatique d'un côté, et coupa la cuisse près du bassin, de manière que la patte n'était unie au corps que par le nerf; puis il établit un courant direct ou inverse à travers le nerf, à l'aide d'un appareil plus fort que celui dont on se sert dans les expériences galvaniques ordinaires: dans les deux cas la patte s'est contractée, tant à l'établissement qu'à la rupture du circuit.

Action des courants électriques sur les végétaux.

2264. Il nous resterait à exposer les recherches relatives à l'action de l'électricité sur les végétaux; elles sont trop peu avancées pour que nous entrions à cet égard dans de grands détails. Nous avons vu que les expériences de M. Pouillet établissaient qu'il y avait toujours de l'électricité développée dans les différents actes de la végétation. Les végétaux sont infiniment moins excitables que les animaux sous l'influence de l'électricité; des expériences précises prouvent que les organes du mouvement des feuilles des différentes espèces du genre *mimosa* sont excitables par l'action du courant électrique quand il a une certaine énergie. Si on a égard à l'influence du courant électrique sur la végétation et sur la germination, on voit avec M. Becquerel que les graines, quand elles germent, les bourgeons, les racines et les feuilles jouissent de la propriété plus ou moins marquée d'expulser un acide; on peut, d'après cela, se rendre compte de l'action de l'électricité voltaïque sur la végétation. Quand une graine est placée au pôle négatif, l'alcali, transporté par l'action du courant, sature naturellement l'acide expulsé, lequel acide, en réa-

gissant sur elle, devait ralentir la germination. Elle se trouve en outre dans l'état le plus favorable pour germer, puisqu'elle se comporte comme le pôle négatif d'une pile ; bien entendu que cet effet a une limite; car, si la pile a une action énergique, elle prive la graine d'oxigène et la désorganise entièrement ; si celle-ci est placée du côté positif, elle se trouve dans un état opposé à celui dans lequel elle est pendant la germination.

§ II. *Développement de l'électricité dynamique chez les êtres organisés.*

2265. On a fait de nombreuses expériences pour constater le développement des courants électriques chez les êtres organisés. Les plus décisives ont rapport aux poissons électriques; nous les exposerons en détail ; les autres ont eu pour but de démontrer qu'il se produit des courants électriques dans la plupart des fonctions de l'organisme.

De l'existence des courants électriques chez les êtres organisés.

On connaît depuis long-temps les expériences qui prouvent que sous l'influence d'un courant électrique, les sels se décomposent à travers une membrane ordinairement imperméable, de façon à ce que des produits acides se portent d'un côté et des produits alcalins d'un autre. Eh bien ! un effet précisément semblable se remarque dans l'économie animale, et peut certainement être attribué avec beaucoup de raison à la même cause. Tous les appareils sécrétoires des animaux fournissent des produits qui sont alternativement acides et alcalins. On peut apercevoir là des phénomènes de transport et de séparation de combinaisons chimiques parfaitement analogues à celles qu'on observe sous l'influence des courants électriques. Ces appareils peuvent être opposés deux à deux et considérés comme les pôles d'une pile. Ainsi, tandis que le rein fournit de l'urine qui est habituellement acide, le foie donne *simultanément* de la bile, qui est un produit alcalin ; tandis que l'estomac à l'époque de la digestion fournit un liquide acide, les glandes salivaires et pancréatiques donnent un liquide alcalin, etc. Resterait à démontrer directement l'existence des courants électriques; plusieurs physiciens l'ont tenté. M. Donné,

ayant mis les deux fils d'un galvanomètre en contact, l'un avec la peau, qui donne un produit acide, l'autre avec la bouche, qui fournit un liquide alcalin, observa un courant électrique marchant de la peau à la bouche. D'une autre part, les deux fils plongeant d'un côté dans la vésicule du fiel, de l'autre dans l'estomac, on observa également un courant considérable de l'estomac à la vésicule. Ces résultats prouvent que des liquides acides et alcalins déjà produits donnent lieu à des courants, mais nullement que ce soient des courants qui produisent des sécrétions de nature opposée.

M. Matteucci paraît avoir obtenu des résultats qui ne laissent aucun doute sur ce fait important, que l'état électrique des surfaces des organes dépend de la vie et subsiste dans les membranes indépendamment des liquides qui les recouvrent. Si les courants dépendaient uniquement de la présence des liquides, ils devraient subsister après la mort; cependant, sur un lapin qui donnait de l'estomac au foie un courant prononcé, ce courant a diminué beaucoup en coupant les vaisseaux sanguins et les nerfs, et a cessé complétement par la décapitation de l'animal. La même expérience a été répétée en tuant un lapin par l'acide cyanhydrique; le courant a paru lié aux contractions convulsives et a cessé avec la vie. Dans ces divers cas, M. Matteucci a toujours vérifié que l'état acide et alcalin des humeurs subsistait après la mort. Il a été plus loin : il a saturé par des réactifs l'état acide et l'état alcalin des surfaces mises en rapport, et il a vu les courants continuer dans le même sens. Ces expériences prouvent évidemment que les fonctions sécrétoires de l'économie animale sont ou déterminées ou accompagnées par des courants électriques; mais il faut de nouvelles expériences pour élucider cet intéressant sujet de recherches.

Poissons électriques.

2266. On connaît depuis long-temps la très remarquable propriété dont jouissent trois espèces de poissons de donner des commotions quand on les touche dans certaines parties de leur corps en les irritant. On les connaît sous les noms de *gymnote*, de *torpille* et de *silure*. Le plus grand est le gymnote; M. de Humboldt en a vu de près de 2 mètres de longueur. La torpille est assez commune sur les bords de la

Méditerranée, où il existe des bas-fonds marécageux ; sa longueur varie de 15 à 30 centimètres. Si on touche l'animal irrité, soit avec un bon conducteur, soit directement, on éprouve une commotion semblable à celle qui résulte de la décharge d'une bouteille de Leyde. Lorsque deux personnes se tiennent par la main, et que l'une d'elles seulement touche l'animal, toutes deux reçoivent la commotion. D'après Walsh, vingt personnes qui se tenaient par la main, et dont les deux placées aux extrémités touchaient, l'une le dos, l'autre le ventre d'une torpille, éprouvèrent toutes la commotion. Quand l'animal est vigoureux, il agit de la même manière, qu'il soit plongé dans l'eau ou dans l'air ; dans l'eau il lance à distance des décharges qui tuent ou au moins engourdissent les animaux dont il veut faire sa proie. Ces commotions sont souvent très fortes. M. de Humboldt affirme n'avoir jamais reçu par la décharge d'une grande bouteille de Leyde une commotion plus effrayante que celle qu'il ressentit en plaçant imprudemment ses deux pieds sur un gymnote qu'on voulait retirer de l'eau ; il fut affecté le reste du jour d'une violente douleur dans les genoux et presque dans toutes les jointures.

Pêche des gymnotes.

M. de Humboldt, conjointement avec M. Bonpland, fit en Amérique des observations très curieuses sur les habidudes et les moyens de pêcher le gymnote. Voici un extrait de la relation de leur voyage.

« A notre arrivée au petit village de Bastro de Abaco, les Indiens nous conduisirent à un petit ruisseau qui, dans le temps de sécheresse, forme un bassin d'eau bourbeuse, entouré de beaux arbres, d'amyris et de mimoses à fleurs odoriférantes. La pêche des gymnotes avec des filets est très difficile à cause de l'extrême agilité de ces poissons qui s'enfoncent dans la vase comme des serpents. On ne voulut point employer le barbasco, c'est-à-dire les racines de *Piscidia erithryna* et de quelques espèces de *phytlantus* qui, jetées dans une mare, enivrent ou engourdissent les animaux : ce moyen aurait affaibli les gymnotes. Les Indiens voulurent pêcher avec des chevaux. Nous eûmes de la peine à nous faire une idée de cette pêche extraordinaire ; mais bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domp-

tés. Ils en amenèrent une trentaine qu'on força d'entrer dans la mare.

» Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles jaunâtres et livides, semblables à de grands serpents aquatiques, nagent à la surface de l'eau et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets. Une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, munis de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare; quelques uns d'entre eux montent sur les arbres dont les branches s'étendent horizontalement au-dessus de la surface de l'eau. Par leurs cris sauvages et la longueur de leurs joncs ils empêchent les chevaux de se sauver en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge réitérée de leurs batteries électriques. Pendant long-temps elles paraissent remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toutes parts dans les organes les plus essentiels à la vie; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau. D'autres haletants, la crinière hérissée, les yeux hagards, et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend. Ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau; cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs. On les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable, excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes.

» En moins de cinq minutes deux chevaux étaient morts. Nous ne doutions pas que la pêche se terminât par la mort successive des animaux qu'on y employait. Mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue ; les gymnotes fatigués se dispersent pour réparer par un long repos et une nourriture abondante ce qu'ils ont perdu de force galvanique. Les chevaux et les mulets parurent moins effrayés ; ils ne hérissaient plus la crinière ; leurs yeux exprimaient moins l'épouvante. Les gymnotes s'approchaient timidement du bord des marais où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. La température des eaux dans

lesquelles vivent habituellement les gymnotes est de 26° à 27°. On assure que leur force électrique diminue dans les eaux plus froides. »

2267. Les poissons électriques possèdent un organe qui leur est propre, et dont la structure particulière peut en quelque sorte servir à expliquer les effets remarquables qu'ils manifestent. La torpille a deux organes distincts où résident ses facultés électriques; ils sont situés de chaque côté de la tête. Hunter et M. Geoffroy-Saint-Hilaire ont reconnu que chacun d'eux est composé d'un grand nombre de tubes aponévrotiques, d'une forme hexagonale, rangés parallèlement les uns à côté des autres autour des branchies, et dont l'une des extrémités repose sur la peau de dessus, et l'autre sur celle de dessous. Hunter a compté 1182 de ces tubes dans un seul organe d'une torpille longue d'un mètre. Tous ces tubes sont exactement fermés à leurs deux extrémités par une membrane également aponévrotique, qui s'étend sur toute la surface de l'animal. Si on examine l'organisation de ces tubes, on les trouve traversés horizontalement, suivant M. Geoffroy-Saint-Hilaire, par de petites membranes placées l'une au-dessus de l'autre à de très petites distances; l'espace compris entre elles est rempli d'une substance qui paraît composée d'albumine et de gélatine. Cet appareil est traversé par des filets nerveux très nombreux, répartis dans chaque tube et correspondant à des nerfs remarquables par leur grosseur.

Des organes électriques.

Fig. 675.

Voici, selon M. Breschet, l'aspect que présentent ces tubes ou prismes hexagonaux qui composent essentiellement l'appareil électrique de la torpille. Si l'on fend la cloison longitudinalement et qu'on la déjette sur les côtés de manière à mettre à nu une des faces du prisme, on voit sur cette face une foule de stries transversales liées entre elles par un tissu cellulaire extrêmement ténu et transparent. Les stries n'indiquent pas des lamelles isolées et superposées les unes aux autres, comme les éléments d'une pile voltaïque; mais tout est lié ensemble, tout forme une masse presque homogène et amorphe, dans laquelle on ne distingue que des stries un peu plus opaques que le reste, que l'on suppose être nerveuses, attendu que leur point de départ correspond aux angles de réunion des cloisons où l'on voit pénétrer les filets



nerveux. La grande quantité de filets nerveux qui pénètrent dans l'intérieur de l'organe tend à confirmer cette manière de voir.

M. Geoffroy-Saint-Hilaire, qui a fait l'anatomie de trois poissons électriques, a tiré les conséquences suivantes de son examen comparatif. Les organes qui donnent à ces poissons la faculté de déterminer des commotions ne sont pas placés de la même manière dans chacun d'eux. Dans la torpille, ils se trouvent de chaque côté de la tête; dans le gymnote, sous la queue; et dans le silure, autour du corps. Aucune branche du système nerveux ne leur est spécialement affectée, attendu que dans la torpille ce sont les nerfs de la cinquième paire qui s'y distribuent; dans le gymnote les nerfs cérébraux, et dans le silure ceux de la huitième paire; enfin la forme des cellules dans chaque espèce n'est pas la même. Quoi qu'il en soit de ces différences, les organes électriques de ces trois poissons, qui ne se trouvent pas dans les espèces analogues, ont une constitution pareille, qui semble indiquer qu'ils sont destinés à remplir des fonctions de même nature.

Étincelle et divers autres effets déterminés par les poissons électriques.

2268. Plusieurs physiciens ont reconnu que les phénomènes électriques que présentent les poissons électriques sont de même ordre que ceux produits par nos appareils. On a successivement obtenu avec cette électricité animale la déviation de l'aiguille aimantée dans le galvanomètre, une élévation de température dans les fils conjonctifs, des décompositions chimiques, et enfin des étincelles électriques qui avaient été aperçues pour la première fois par Walsh sur le gymnote, mais sans qu'on pût les reproduire comme on le voulait. MM. Matteucci et Linari sont parvenus à les obtenir à volonté sur la torpille. On prend un tube en verre recourbé en U rempli en partie de mercure, à chaque extrémité duquel est fixé, au moyen d'un bouchon de liége et de cire d'Espagne, un fil de fer dont l'un des bouts s'arrête à une très petite distance de la surface du mercure; l'appareil est fixé avec du mastic sur un socle de bois enduit de vernis. Les extrémités des fils de fer situés en dehors du tube sont mises en communication avec des fils très courts de platine, terminés par des lames de même métal, destinés à mettre en communication l'appareil avec diverses parties de la torpille. En

établissant cette communication, on obtient une étincelle électrique visible, même pendant le jour, à l'endroit où les conducteurs sont interrompus.

M. Matteucci est parvenu à obtenir l'étincelle en posant la torpille sur un plat de métal isolé, et plaçant dessus un autre plat de métal, puis fixant sur chacun d'eux une feuille d'or, l'une et l'autre éloignées d'un demi-millimètre. En mouvant légèrement le plat métallique supérieur, on irritait l'animal, et au même instant les deux feuilles se rapprochaient, et l'on voyait aussitôt éclater l'étincelle.

La direction du courant électrique produit lors de la décharge de la torpille a été observée par MM. Becquerel et Breschet. Il résulte de leurs expériences que la partie supérieure de l'organe électrique fournit à la décharge l'électricité positive, et la partie inférieure l'électricité négative. M. Matteucci a de plus observé que les points de l'organe sur la surface dorsale, placés au-dessus des nerfs qui les pénètrent, sont positifs à l'égard des autres points de la même face dorsale; les points de l'organe situés sur la face ventrale, correspondants aux points qui sont positifs sur la surface dorsale, sont négatifs à l'égard des autres points de la surface ventrale. L'intensité du courant varie avec l'étendue des lames de platine qui terminent le galvanomètre, et avec lesquelles on touche les deux faces de l'organe. Lorsque la torpille est très excitable, le courant peut être comparé à celui d'une pile d'un grand nombre de couples chargée avec un liquide actif, bon conducteur; et quand sa vitalité s'affaiblit, le courant électrique se rapproche de celui d'une pile composée d'un petit nombre d'éléments.

M. Matteucci a encore fait sur la torpille plusieurs remarques importantes. Le cerveau étant mis à découvert, si l'on en irrite certaines parties avec un corps quelconque, la décharge se manifeste aussitôt; les deux premiers lobes ou lobes cérébraux peuvent être irrités, coupés et même détruits sans que la décharge disparaisse. Il en est de même du troisième lobe; quant au quatrième, on ne peut le toucher sans avoir de fortes décharges. En le détruisant, quand bien même on laisse subsister les autres, la puissance électrique de l'animal est anéantie. Cependant, en étudiant l'influence des nerfs qui vont à l'organe, M. Matteucci s'est assuré que

ces nerfs, lors même qu'ils sont séparés du quatrième lobe, produisent encore la décharge quand on les irrite; mais ces décharges sont limitées à la partie de l'organe dans laquelle se ramifie le nerf irrité.

Enfin M. Matteucci a tiré les conséquences suivantes de l'ensemble des faits qu'il a observés : 1° toute action extérieure ou irritation exercée sur le corps de la torpille vivante et qui détermine la décharge électrique, est transmise par les nerfs du point irrité au quatrième lobe du cerveau ; 2° toute irritation exercée sur ce quatrième lobe, et sur les nerfs qui en sortent et qui vont à l'organe, est suivie d'une décharge électrique sans aucune espèce de contraction. La liaison qui existe entre le quatrième lobe et les nerfs qui en partent d'une part, et la substance de l'organe de l'autre, est précisément la même que celle qui se trouve entre un nerf quelconque et les muscles dans lesquels il est ramifié. Dans le cas de la torpille, quand on agit sur son quatrième lobe et sur ses nerfs, on a la décharge électrique; dans l'autre cas, la contraction, toutes les causes qui déterminent ou empêchent la contraction, sont également celles qui favorisent ou détruisent la décharge de la torpille.

Lorsque toute action stimulante a déjà cessé de déterminer la décharge de la torpille, le courant électrique a encore ce pouvoir. Ce fait semble indiquer à M. Becquerel une analogie remarquable entre la puissance nerveuse et l'électricité.

CHAPITRE VIII.

DES PHÉNOMÈNES LUMINEUX DÉTERMINÉS PAR L'ÉLECTRICITÉ.

§ I. *Théorie de la phosphorescence.*

Définition. 2269. On donne le nom de phosphorescence à la propriété qu'acquièrent plusieurs corps de devenir lumineux dans l'obscurité par élevation de température, par insolation, par percussion ou frottement, par les décharges électriques; on

reconnaît enfin les phosphorescences spontanées. Ces phénomènes ont été déjà étudiés (1382 et 1383). Nous allons actuellement en donner la théorie, et discuter les relations qu'ils peuvent présenter avec l'électricité.

Théorie de la phosphorescence.

L'étude de la phosphorescence se rattache à l'électricité, parce que, d'après M. Becquerel, toutes les lueurs phosphoriques sont dues à une neutralisation lente de deux électricités, laquelle s'effectue entre les molécules de corps doués d'une faible conductibilité; il suit de là que toute cause qui peut séparer les deux fluides électriques, dans ces mêmes particules, peut déterminer la phosphorescence. Voici en résumé les principes de la théorie adoptée par M. Becquerel: 1° dès que les particules des corps sont ébranlées ou séparées par la chaleur, par le frottement, par la percussion, par une action chimique ou par le mouvement de l'électricité, le fluide électrique neutre est décomposé; 2° les fluides séparés doivent se combiner de nouveau, quand ces diverses causes accidentelles persévèrent ou cessent d'agir, et cette recomposition peut occasionner, suivant les cas, une élévation de température, ou des jets de lumière qui expliquent toutes les lueurs phosphoriques; 3° pour qu'il y ait lumière produite dans cette circonstance, il faut que la combinaison des fluides séparés s'opère lentement et sous une tension assez forte; le phénomène ne peut donc se manifester que dans les corps qui conduisent mal l'électricité. Nous ne reviendrons pas sur les différentes sortes de phosphorescences; nous nous contenterons de rapporter quelques traits importants de phosphorescence déterminée par la chaleur et par les étincelles électriques.

Phosphorescence par la chaleur.

La plupart des corps qui peuvent devenir phosphorescents acquièrent cette propriété par la chaleur, mais à une température qui diffère d'un corps à l'autre : pour quelques uns la chaleur de la main est suffisante, pour le plus grand nombre il faut une chaleur plus ou moins forte. Dans ce dernier cas, M. Brewster employait un canon de pistolet dont la lumière était bouchée; il introduisait le minéral dans la culasse, qu'il plaçait ensuite sur le feu; il lui était facile alors d'apercevoir la phosphorescence en regardant dans le canon. Pour garantir son œil de l'air chaud, il plaçait devant l'ouverture une lame de verre et quelquefois un petit téles-

cope ajusté de manière à rendre distincte la vision des objets situés au fond du canon.

Voici les résultats généraux déduits des nombreuses expériences faites par Placidus Heinrich. Toutes les pierres calcaires sont phosphorescentes, et sous ce rapport le spath-fluor, et surtout la variété connue sous le nom de *chlorophane*, vient au premier rang; elle devient phosphorescente par la seule chaleur de la main, quand elle est restée long-temps dans l'obscurité; elle reste luisante plus long-temps que les autres à la même température.

Le marbre blanc du Tyrol, le calcaire cristallisé, donnent une lumière presque aussi belle que les spath-fluors.

Les sulfates calcaires sont moins phosphorescents. Les pierres siliceuses, comme le silex, ne ressemblent pas à beaucoup près aux substances à base de chaux. La température du cuivre chauffé au rouge rend ces substances luisantes lorsqu'elles sont réduites en poudre. Il faut une chaleur plus élevée pour les morceaux d'une certaine grosseur. La chaux, qui est elle-même phosphorescente à une certaine température, conserve donc cette propriété dans ses combinaisons.

Le diamant est remarquable par l'éclat dont il brille sous l'influence de la chaleur. Sa température de phosphorescence varie de 60 à 90°. Les pierres qui brillent le plus après le diamant, sont la topaze de Saxe, l'améthyste et quelques jaspes, l'émeraude, l'hyacinthe, etc. Les verres colorés par des oxides métalliques luisent mieux que les verres blancs; les cailloux et le sable des rivières mieux encore que le verre coloré. Dans les sels, on remarque, outre la lumière permanente, une autre lumière d'étincelles qui a peu de durée. Les sels qui fondent dans leur eau de cristallisation, en s'échauffant, ne luisent pas; le sel marin perd son pouvoir phosphorescent si on le fait rougir préalablement. Les composés métalliques qui produisent une lueur de plusieurs secondes sont les minerais de cuivre, la malachite, le sulfate de cuivre, les minerais de fer, l'oxide de zinc, les minerais d'antimoine, de cobalt, de manganèse et autres.

Phosphorescence par les décharges électriques.

2270. Plusieurs physiciens, parmi lesquels on doit surtout citer M. Pearseall, ont étudié la phosphorescence déterminée par les décharges électriques. Pour exécuter cette expé-

rience, on place le corps que l'on veut essayer sur la table de l'excitateur universel, de manière que les deux boules en soient distantes de 0m,02 à 0m,03; on opère alors la décharge d'une bouteille de Leyde. Après l'explosion, on observe dans le trajet parcouru par l'étincelle, et sur le corps supposé actif, une traînée de lumière qui dure un certain temps. Le sucre, le linge fin, le gypse, tous les corps phosphorescents par insolation, sont lumineux dans l'obscurité quand on fait passer sur eux la décharge d'une bouteille de Leyde. Un fragment de baryte sulfatée, ou d'acétate de potasse, donne une lumière verte brillante. Les coquilles d'huîtres calcinées présentent toutes les couleurs; réduites en poudre, leur effet est moindre; leur phosphorescence est plus durable et plus vive quand elles ont été calcinées avec du soufre. Le cristal de roche émet une lumière rouge d'abord, puis blanche.

On sait en outre que les décharges électriques possèdent aussi la propriété de rendre phosphorescents, par l'élévation de température, les corps qui ont perdu cette faculté par l'action d'une chaleur trop élevée, propriété que ne possède pas la lumière solaire, du moins à un degré aussi marqué. C'est ainsi qu'un morceau de chlorophane, qui a cessé d'être phosphorescent parce qu'on a trop élevé la température, le devient quand on le chauffe après l'avoir préalablement exposé à l'action de la décharge d'une seule bouteille de Leyde, effet que l'on n'obtient pas par l'exposition au soleil. Plusieurs fluors, ainsi que la chaux phosphatée, se comportent de même. Enfin des corps non phosphorescents dans l'état naturel, tels que le marbre blanc et des fluors non colorés, le deviennent par la chaleur quand ils ont été exposés aux décharges électriques.

Phosphorescence par la lumière électrique.

2271. Il était intéressant de vérifier si la lumière électrique agissait à distance pour produire la phosphorescence comme agit la lumière solaire. Pour établir ce fait, M. Becquerel place sur l'excitateur une capsule de porcelaine remplie de coquilles d'huîtres nouvellement calcinées avec du soufre, et fait passer à 0m,02 de distance la décharge d'une batterie de dix-huit bocaux : les coquilles s'illuminent aussitôt, et leur lumière persévère plus ou moins long-temps. Cette phosphorescence se manifeste encore, mais de plus en

plus faiblement, lorsqu'on augmente la distance de la décharge. Si, opérant à la même distance, l'on couvre la capsule avec des lames de verre blanc, ou diversement coloré de un ou plusieurs millimètres d'épaisseur que l'on retire rapidement après l'explosion, l'intensité de la phosphorescence produite varie suivant la nature de l'écran que la lumière avait dû traverser. Avec une lame de verre blanc de $0^m,003$ d'épaisseur, la lumière fut beaucoup plus faible qu'avant l'interposition de l'écran; avec une lame de verre de $0^m,008$, ou avec une feuille de papier glacé très transparent, ayant au plus un cinquième de millimètre d'épaisseur, l'effet fut à peine sensible. Une lame de verre rouge, ou jaune, ou vert, de $0^m,002$ d'épaisseur, a enlevé entièrement à la radiation électrique la propriété d'exciter la phosphorescence, tandis qu'un verre violet foncé, de même épaisseur, s'est comporté à peu près comme le verre blanc. Avec un verre bleu, l'effet était plus faible, mais très sensible. M. Biot entreprit une série d'expériences dans le but de rechercher s'il existe une quatrième espèce de radiation, distincte des radiations lumineuse, calorifique, chimique, et qui aurait exclusivement la faculté de faire naître la phosphorescence; de concert avec M. Becquerel, il a répété les expériences de ce dernier physicien en employant ou des écrans de nature différente ou des écrans mixtes, c'est-à-dire formés par la réunion de différentes lames. Parmi les résultats qui démontrent que la portion de la radiation électrique qui détermine la phosphorescence est physiquement distincte de celle qui produit la vision sur la rétine humaine, voici le plus saillant. Une plaque de cristal de roche enfumé, perpendiculaire à l'axe, et épaisse de 21 millimètres 3/4, se laissa traverser par des rayons provenant de l'étincelle électrique, qui déterminèrent une vive phosphorescence, tandis que dans les mêmes circonstances une lame de verre de 3^{mm} 11/20 n'en produisit pas d'appréciable. Il résultait d'expériences de Grothus, touchant l'influence des rayons colorés du spectre sur la production de la phosphorescence, que de tous les rayons lumineux, les rayons violets sont ceux qui excitent le plus la phosphorescence, tandis que les rayons rouges sont ceux qui l'excitent le moins. Wilson et Ritter firent les mêmes observations; mais ils précisèrent mieux les faits en annonçant

que les corps qui sont lumineux dans l'obscurité perdent instantanément cette propriété quand on les expose à l'action de l'extrémité rouge du spectre. M. E. Becquerel a reconnu que les coquilles d'huîtres calcinées deviennent phosphorescentes bien au-delà de la limite du violet. M. Biot a vu que les rayons transmis par l'alun, qui déterminent également des phénomènes de phosphorescence très peu développés, sont très peu efficaces pour exciter les impressions calorifiques. Le verre rouge a été absolument inactif sur le papier impressionnable, et il imprime aux écailles d'huîtres calcinées une faible lueur, et ce genre de verre n'est que peu inférieur au verre blanc pour la transmission des radiations calorifiques. M. Biot considère les radiations émanées des corps comme composées d'une infinité de rayons ayant des qualités et des vitesses diverses, susceptibles d'être émis, absorbés, réfléchis, réfractés, et qui, selon leurs qualités propres, parmi lesquelles il faut comprendre leur nature et leur vitesse actuelle, peuvent produire la vision, la chaleur, déterminer certains phénomènes chimiques, et probablement exercer beaucoup d'autres actions encore inconnues, lorsqu'ils sont reçus par des corps ou par des organes sensibles à leurs impressions.

Il est vraisemblable que la lumière solaire ou la lumière électrique agissent sur les corps phosphorescents en leur communiquant un nouveau mode d'arrangement moléculaire instable. Les électricités dégagées au fur et à mesure que les molécules reprennent leur position primitive d'équilibre, se recombinent et forment la lueur phosphorique. Les corps bons conducteurs ne sont jamais phosphorescents, parce que les électricités dégagées par l'action des rayons solaires se réunissent immédiatement au contact avant d'avoir acquis une certaine tension.

Une preuve que la phosphorescence est due à un nouveau mode d'arrangement moléculaire, c'est que les diverses variétés de chaux fluatée ne sont phosphorescentes qu'autant qu'elles sont colorées, bien qu'elles aient toutes la même composition chimique. Pearseall, en soumettant de la chaux fluatée blanche à des décharges électriques, lui a communiqué en certaines parties une teinte violacée, de manière à lui donner dans les mêmes parties l'aspect d'une fluorine

violette naturelle; elle devient alors phosphorescente par la chaleur comme celle-ci.

On le voit donc, d'après M. Becquerel, les lueurs phosphoriques sont toujours occasionnées par la combinaison lente des deux électricités.

§ II. *De la composition de la lumière électrique.*

Expériences de M. Wheastone.

2271 bis. Nous avons vu que la lumière électrique comprenait des rayons susceptibles d'exciter la phosphorescence, contient-elle également tous les rayons chimiques qui accompagnent la lumière solaire? On sait déjà que le spectre lumineux de l'étincelle électrique et le spectre solaire présentent des différences; on pourrait presque en conclure que les spectres chimiques doivent également n'être pas identiques. La continuité d'action de plusieurs piles électriques et de l'appareil électro-magnétique de Clark a permis d'étudier dans ces derniers avec soin la composition de la lumière électrique. Voici les résultats obtenus par M. Wheastone au moyen d'un appareil électro-magnétique. Les bouts du fil hélicoïdal sont disposés à une très petite distance l'un de l'autre, afin d'obtenir une étincelle continue dont la position reste fixe; ou bien un des bouts est maintenu très près de la surface d'un bain de mercure ou de tout autre liquide dans lequel plonge l'autre bout, ou encore près de la surface d'une masse de métal introduite dans le circuit. La lumière de l'étincelle est alors observée à travers un prisme très pur, à l'aide d'une lunette munie d'un micromètre, comme faisait Fraunofer. Le spectre de l'étincelle tirée du mercure se compose de sept bandes colorées, séparées par des intervalles obscurs, savoir, deux bandes orangées très voisines, une verte et une brillante, deux vert bleuâtre, une pourpre et très brillante, et enfin une violette. Quand l'étincelle est tirée du zinc, du bismuth ou du plomb fondu, le nombre, la position et la couleur des bandes sont très différents. Le spectre correspondant à chaque métal ne varie pas quand l'étincelle a lieu dans le vide, dans l'air, l'oxigène ou l'acide carbonique. Si l'étincelle est tirée entre des boules de deux métaux différents, on distingue dans le spectre les bandes qui appartiennent à chacun de ces métaux.

M. de la Rive s'est occupé dans ces derniers temps de la même question (Comptes-rendus de l'Académie des sciences, 17 mai 1841); il a opéré avec une pile voltaïque puissante. Il a constaté que, soit dans l'air, soit dans le vide, il n'y a jamais d'arc lumineux entre deux pointes de charbon placées entre les pôles de la pile avant qu'elles aient été en contact; mais une fois qu'elles se sont touchées, et que le courant en les traversant les a fortement échauffées dans le voisinage de leur point de contact, on peut les écarter considérablement et continuer à voir entre elles un arc lumineux brillant. La production de cette lumière est accompagnée d'un transport considérable de molécules de charbon du pôle positif au pôle négatif. Ce transport est surtout sensible dans le vide, vu que dans l'air une grande partie de ces molécules brûlent dans le trajet. Ce phénomène est lié au précédent, en ce sens que, suivant M. de la Rive, les pointes de charbon une fois échauffées par le courant qui a pu les traverser pendant qu'elles étaient en contact, ce même courant peut plus facilement détacher les molécules du pôle positif pour les porter au pôle négatif, et établir ainsi entre les deux pointes une communication de matière pondérable qui transmet le courant. L'action de l'aimant sur l'arc lumineux, que M. de la Rive a étudiée avec soin, fournit une preuve en faveur de cette assertion. En effet, l'aimant attire ou repousse d'une manière prononcée l'arc lumineux; mais ce qu'il attire ou repousse, c'est ce conducteur formé de la série des particules de carbone transportées d'un pôle à l'autre, et traversées par le courant. Aussi fait-il cesser la lumière et le courant en éloignant trop les unes des autres les particules qui la transmettent dès qu'on ne le tient pas extrêmement près de l'arc lumineux.

Expériences de M. de la Rive.

M. de la Rive ajoute que plus on étudie les phénomènes que présente l'électricité, plus on arrive à reconnaître que cet agent diffère dans la forme sous laquelle il se présente à nous de la lumière et du calorique, quoiqu'il ait avec eux des rapports intimes. Ainsi, tandis que la lumière et le calorique peuvent, à l'état rayonnant, se manifester indépendamment de la matière pondérable, l'électricité lui paraît ne pouvoir jamais en être isolée. Cette manière de considérer la lumière électrique semblerait contredire l'explication que

nous avons donnée d'après M. Becquerel de la phosphorescence; car, si on admet que toutes les sortes de phosphorescences sont dues à la neutralisation des deux fluides électriques, on doit penser naturellement que cette neutralisation donne lieu à des phénomènes lumineux sans qu'il y ait transport de matière pondérable; car il paraît bien difficile de croire, quoique cela cependant ne soit point impossible, que les lueurs pâles et fugitives de la phosphorescence soient dues à des molécules pondérables détachées. Si on admet que la lumière phosphorique a une origine électrique comme l'aurore boréale, dont nous allons parler; si on considère que toutes les lumières artificielles ont pour cause des réactions chimiques, et sont conséquemment accompagnées de la neutralisation d'électricités contraires, l'incandescence des métaux non oxidables, qu'elle soit produite par la haute température d'un fourneau, ou par un fort courant voltaïque, ne peut provenir que de la même cause, c'est-à-dire d'une suite de décompositions et de recompositions de fluide électrique neutre. Il résulte de ces rapprochements que toute lumière produite à la surface de la terre a une origine électrique, et qu'elle se compose des mêmes rayons simples que la lumière solaire, groupés suivant des proportions différentes qui constituent ainsi les différences qu'on a remarquées. Il y a donc lieu de croire que la lumière des astres est aussi due à des phénomènes électriques.

§ III. *De l'aurore boréale.*

Définition et marche du phénomène.

2272. On donne le nom d'*aurore boréale* à une lueur formée par des rayons lumineux diversement colorés, qui jaillissent de toutes les parties de l'horizon à certaines époques dans l'hémisphère ou nord, ou sud. Elle s'annonce après le coucher du soleil par une lueur confuse; des jets de lumière irréguliers s'élèvent ensuite de l'horizon et tendent vers le zénith. Plus tard, ces jets se concentrent de manière à former deux vastes colonnes, l'une à l'est, l'autre à l'ouest, qui s'élèvent lentement et qui sont sillonnées par des traits de lumière plus ou moins vifs. Ces colonnes, dont la couleur varie du jaune au vert et au pourpre, finissent par se réunir. L'arc qu'elles forment alors dure avec tout son éclat pendant plusieurs heures; dans l'espace obscur qu'il circonscrit,

on aperçoit de temps en temps des traits de flamme qui sillonnent l'arc lui-même et vont se concentrer au-delà du zénith, dans un petit espace que l'on appelle la couronne de l'aurore boréale.

Ce point du ciel où ces rayons convergent est précisément celui vers lequel se dirige une aiguille aimantée, librement suspendue par son centre de gravité. Les cercles concentriques qui précèdent les jets lumineux ont de la ressemblance avec l'arc-en-ciel, reposent chacun sur deux parties de l'horizon également éloignées du méridien magnétique; leurs points les plus élevés se trouvent exactement dans ce même méridien.

Cela suffirait pour faire donner aux aurores boréales une origine électrique; mais on est encore frappé de la ressemblance qu'elles présentent avec quelques uns des effets de l'électricité, lorsqu'elle traverse un milieu raréfié : il en résulte une lumière diffuse, semblable à celle qui caractérise l'aurore boréale; même variété de couleur et d'intensité, même mouvement d'ondulation. Les jets de lumière de l'aurore boréale se divisent quelquefois en nombreuses ramifications, et d'autres fois se réunissent de manière à ne former qu'une masse lumineuse; diverses portions des jets prennent une teinte purpurine embrasée; il en est de même de l'électricité, lorsque la raréfaction de l'air est très grande.

Ce qui achève enfin la démonstration de l'identité d'origine, c'est l'action que l'aurore boréale exerce sur la marche des variations de l'aiguille aimantée dans des lieux très éloignés de ceux où le phénomène se remarque, et peut-être sur toute la surface du globe; on a pu ainsi prédire avec certitude l'apparition d'aurores boréales dans les lieux où elles ne sont nullement visibles (2018). La déclinaison éprouve des variations anomales tant que dure une aurore boréale.

Les aurores boréales sont d'autant plus visibles qu'on est plus rapproché du pôle. Dans les îles Shetland, elles ont un éclat des plus remarquables; elles commencent ordinairement à se manifester à l'entrée de la nuit, précisément au-dessous de l'horizon, sans rien présenter de particulier sous le rapport de l'éclat ou du mouvement; mais peu à peu elles donnent naissance à des courants lumineux, jetant beaucoup d'éclat et dont les colonnes changeantes varient de

formes et de couleur; elles embrassent ordinairement la partie de l'atmosphère accessible à la vue et offrent un spectacle magnifique qui frappe vivement l'imagination. Sous la latitude nord de la Laponie, leur lumière suffit pour éclairer les voyageurs pendant toute la nuit. Dans les parties nord-est de la Sibérie, les rayons lumineux, qui présentent les teintes les plus variées, se meuvent avec une vitesse incroyable. Selon M. L. A. Necker, les aurores boréales sont incroyablement plus grandes et plus belles et plus compliquées à Sky que près d'Édimbourg. Là, elles atteignent rarement le zénith; à Sky, au contraire, elles le dépassent presque constamment et occupent la plus grande partie du ciel. Le 3 janvier 1840, on a observé jusqu'à Genève une très belle aurore boréale rouge; le 12 septembre 1621, une aurore boréale fut observée par Gassendi à Peymers en Provence; elle fut aperçue en même temps dans tout le Dauphiné, à Bordeaux, à Dijon, à Paris, à Rouen, dans toute l'Europe et jusqu'à Alep en Syrie. On voit quelquefois les aurores boréales commencer avant la nuit, et leurs fuseaux de lumière vive et blanche se projeter sur la couleur jaune et orangée qui règne au couchant. La distance d'une aurore boréale à la surface de la terre, observée durant le voyage du capitaine Franklin, était de 3 à 4 lieues.

M. Necker, d'accord avec plusieurs autres observateurs, n'a jamais pu parvenir à entendre aucun bruit particulier, même pendant les aurores boréales les plus grandes et les plus vives, à Sky, où régnait le plus grand calme et le plus profond silence. Cependant M. Necker a recueilli dans les îles Shetland de nombreux témoignages à cet égard, d'autant plus remarquables qu'ils étaient entièrement spontanés et nullement influencés par aucune question préalable. Tous ont reconnu que lorsque l'aurore boréale est forte, elle est accompagnée d'un bruit qu'on peut comparer à celui d'un van lorsqu'on vanne du blé. M. Biot avait également recueilli des habitants des mêmes îles des témoignages unanimes du fait dont il est question, mais lui-même n'en a pas été témoin.

Théorie de l'aurore boréale. L'influence considérable que l'aurore boréale exerce sur les aiguilles aimantées démontre qu'elle est accompagnée de courants électriques qui doivent avoir une assez grande in-

tensité. Ces courants électriques ont probablement lieu autour de particules pondérables, comme cela se passe dans les aimants; l'action magnétique de la terre doit alors disposer ces particules en colonnes parallèles entre elles et également parallèles à l'axe magnétique. On peut penser avec beaucoup de probabilité que l'aurore boréale est excitée par l'accumulation de l'électricité vers les hautes régions de l'atmosphère, dans les climats froids, où le peu de fréquence des orages et la sécheresse habituelle de l'air mettent obstacle à son libre écoulement dans le sol. M. A. Necker a remarqué que plusieurs fois les aurores boréales de l'Écosse ont été accompagnées de gelée blanche et le plus grand nombre d'entre elles ont été suivies par de grandes chutes de pluie ou de neige et par des coups de vent violents et des tempêtes; sous ce dernier rapport, les observations de ce savant confirment l'opinion généralement admise en Écosse que les aurores boréales sont les avant-coureurs de mauvais temps ou de forts vents.

CHAPITRE IX.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE ET SUR LA THÉORIE DU CONTACT.

2273. On comprend sous le nom d'électricité dynamique l'ensemble des phénomènes d'électricité en mouvement que nous avons étudiés dans les chapitres précédents; cette expression a été adoptée par opposition à celle d'électricité statique qu'on affecte à l'électricité dont les propriétés s'annoncent principalement par des phénomènes de tension, tandis que l'électricité dynamique produit surtout les phénomènes des courants. Quoi qu'il en soit, cette distinction n'est pas aussi fondée qu'elle le paraît au premier abord. Définition de l'électricité dynamique.

Si nous cherchons maintenant à jeter un coup d'œil en arrière sur la longue série des faits que comprend l'électricité dynamique, nous voyons les courants électriques agir les uns sur les autres, suivant des lois particulières. Nous les voyons produire l'aimantation, et *vice versâ*, des aimants

produire des courants. Nous voyons également la chaleur, les combinaisons chimiques, donner naissance à des courants électriques, et réciproquement des courants électriques donner lieu à des phénomènes de chaleur, à des combinaisons et des décompositions chimiques, toujours cette même opposition, l'électricité dynamique, agissant comme cause ou résultant comme effet des phénomènes qu'elle peut elle-même déterminer; voilà le point qui causera toujours de grands embarras lorsqu'on voudra pénétrer plus avant dans la connaissance de cet agent de la nature, qui partout fait sentir son influence, qui est intimement lié au principe de la chaleur du magnétisme, et à la constitution des corps inorganiques, et qui est toujours présent, toujours actif dans tous les mystérieux phénomènes que nous présente l'étude des êtres organisés.

La science de l'électricité est tellement étendue qu'elle envahit toutes les autres parties de la physique; ainsi les plus légers troubles apportés dans l'équilibre intérieur des corps par une cause quelconque, les actions capillaires elles-mêmes donnent naissance à des courants électriques; la chaleur et l'électricité, comme nous l'avons dit, se suivent et se transforment l'une dans l'autre, lors de leur passage à travers les substances pondérables; l'électricité enfin est une source lumineuse tellement active que c'est la seule, peut-être, qui puisse imiter à la surface de la terre l'éclat du soleil.

M. de la Rive s'est assuré qu'en éclairant dans une chambre obscure un buste en plâtre avec la lumière des pointes de charbon placées entre les pôles de la pile, on peut en 10 minutes obtenir une empreinte d'un buste au daguerrotype. Ce résultat prouve que la lumière dont il s'agit a les mêmes propriétés que la lumière solaire et que, comme elle, elle conserve ses propriétés lors même qu'elle est réfléchie.

Si on veut remonter à la cause générale des phénomènes électriques, il faut donc demander des notions à toutes les parties de la physique; et si l'on veut rassembler tous les effets de l'électricité, travail indispensable pour procéder avec ordre à la recherche de leur cause générale, il faut faire intervenir la chimie, la physiologie et presque toutes les sciences naturelles; car la science de l'électricité se rattache à tout. On le voit, cette tâche présente de telles difficultés que

nous ne pensons pas même l'aborder dans ce traité élémentaire; cependant, il est un point important de théorie sur lequel un grand nombre de physiciens ont fait des expériences contradictoires dans ces dernières années, et sur lequel mon attention a surtout été fixée et que je crois convenable de discuter ici; je veux parler de la théorie du contact.

2274. Volta, comme nous l'avons vu précédemment, admet que la cause du développement de l'électricité dans la pile est le contact des deux métaux hétérogènes, et que les corps liquides interposés ne jouent le rôle que de conducteurs. Cette opinion ne peut être adoptée sans modification, car on sait depuis long-temps que ces liquides interposés sont d'autant plus propres à développer de l'électricité qu'ils attaquent plus vivement un des métaux. On peut même en changeant la nature du liquide renverser à volonté les pôles d'une pile. Davy employa pour cette expérience une pile à couronnes. Si l'on établit l'appareil avec des plaques de cuivre et de fer et que l'on verse dans les bocaux de l'eau pure, le fer s'électrise positivement et s'oxide; le cuivre s'électrise négativement et dégage de l'hydrogène; le contraire se produit si, au lieu d'eau pure, on met dans les bocaux une dissolution de sulfure de potasse; le fer devient négatif et dégage de l'hydrogène, tandis que le cuivre devient positif et s'oxide; ainsi la direction du courant change avec la nature du corps humide interposé.

Théorie du contact.

Renversement des pôles de la pile.

Davy ne vit point dans cette expérience une objection sans réplique contre la théorie de Volta; voici comme il rend compte de ce fait. L'eau interposée n'a sur les métaux qu'une action très faible et n'est là que pour empêcher que chaque élément métallique ne se touche. Mais si, au lieu d'eau, on emploie une substance qui ait plus d'action sur l'électricité d'un des métaux employés dans la pile que n'en a sur celui-ci l'autre métal, la direction du courant électrique doit changer; c'est précisément ce qui arrive dans le couple cuivre, fer, sulfure de potasse, attendu que les deux métaux ont sur leurs électricités respectives une action très faible, et le sulfure de potasse, au contraire, agit d'une manière très sensible, puisque l'on peut s'en servir pour remplacer un des éléments métalliques de la pile de Volta. Quoi qu'il en soit, il n'en est pas moins démontré, et par cette expé-

rience de Davy, et par des expériences aussi nombreuses que délicates de M. de la Rive, que non seulement la direction, mais encore l'intensité du courant est proportionnelle à l'action chimique. Mais ces faits étant admis, doit-on complétement rejeter l'hypothèse de Volta? Je ne le pense pas, et je regarde comme certain qu'il se développe au contact des corps hétérogènes une force particulière qui a une influence plus ou moins marquée sur l'énergie et sur la nature de toutes les réactions chimiques; qu'en négligeant son appréciation, on peut commettre une foule d'erreurs, et que, au contraire, en la prenant en considération, on trouve une explication raisonnable de plusieurs phénomènes de la nature.

Influence du contact sur les actions chimiques.

2275. Sans aucun doute la production de l'électricité est intimement liée à l'action chimique, mais l'intensité de l'action chimique est aussi en rapport avec la nature du contact.

Nous avons cru qu'un travail qui présenterait des relations numériques de l'influence du contact dans plusieurs actions chimiques pourrait conduire à la solution de quelques problèmes encore obscurs de la philosophie naturelle. Nous avons fait construire des vases semblables de métaux différents les plus purs possibles; nous avons fait des balles de même forme et de même poids avec des métaux que nous voulions soumettre à l'action chimique. On plaça dans chaque vase une balle; on ajouta alors la même quantité du même acide, au même degré de concentration; l'action fut continuée pendant un temps parfaitement semblable. Toutes les conditions étaient identiques : la seule différence dans toutes les expériences est la nature des vases, la seule force différente est la force électro-motrice développée par le contact de métaux hétérogènes, la balle et les vases. La différence d'action chimique tiendra donc uniquement à cette cause. Pour être sûr de n'être point trompé par quelque cause étrangère que nous n'avions point prévue, et pour nous assurer si la différence d'action tenait bien à la différence de la force électro-motrice, et si les variations auxquelles elle était soumise n'étaient point dues à des circonstances incertaines, qui ne nous permettraient point d'obtenir avec exactitude la mesure de la force que nous voulions connaître, nous fîmes les expériences suivantes : quatre balles de zinc distillé du même poids, et en tout parfaitement sem-

blables, furent placées dans quatre vases de verre semblables, avec la même quantité d'acide sulfurique extrêmement dilué. Après une heure d'action, les quatre balles furent retirées, essuyées et pesées : l'eau acidulée avait enlevé à chacune des balles précisément deux milligrammes. Ces mêmes balles furent placées dans quatre vases : 1° platine, 2° or, 3° argent, 4° verre. L'action dura également une heure pour toutes avecla même quantité d'eau acidulée ; les balles pesées après l'action présentèrent les nombres suivants : Platine 79, or 65, argent 51, verre 1 + ½. Il est évident que le contact des corps hétérogènes a donné à l'action chimique une énergie nouvelle. Ces différences sont si notables que nulles causes d'erreur ne peuvent être invoquées. Il résulte de ces expériences, d'une manière incontestable, que par le seul fait du contact les corps se constituent dans des états électriques différents; le métal positif l'est d'autant plus qu'il est en contact avec un corps plus négatif. Ainsi la mesure de l'action chimique peut nous offrir la mesure de la force électro-motrice mutuelle des corps. Par le contact de l'acide sulfurique affaibli sur le zinc, l'acide prend un excès d'électricité négative ; le zinc, au contraire, un excès d'électricité positive. Mais lorsqu'on emploie un acide très étendu, le zinc ne se constitue pas dans un état assez positif pour que l'action chimique acquière une grande énergie ; mais si, par le contact avec des conducteurs de première classe fortement négatifs, on rend le zinc plus positif, alors l'énergie de l'action sera en raison directe de l'énergie de l'état particulier développé par le contact.

Il résulte pour nous de ces expériences que, dans le contact de deux métaux, le développement d'électricité n'est pas dû à la différence d'action exercée par le liquide sur les deux métaux ; mais il nous paraît démontré que la force électro-motrice, développée par le seul fait du contact, exerce une influence directe sur l'action chimique que le liquide doit avoir sur le métal positif ; par conséquent que le développement de cette force est antérieur à l'action chimique ; que l'action chimique n'est pas la cause première du développement de l'électricité, mais au contraire que l'énergie de l'action chimique est sous la dépendance de la force électromotrice développée par le contact. On pourrait peut-être ob-

jecter que la différence d'action doit être attribuée à la différence de conductibilité des divers métaux ; mais cette raison n'est point fondée. En effet, il est incontestable que l'étendue du contact a une influence évidente sur l'énergie de l'action. Voici un fait très facile à vérifier qui le prouve, et qui établit qu'on doit invoquer une autre cause que la conductibilité pour expliquer la différence d'action. Si, d'une part, on prend une lame fabriquée en corroyant ensemble des feuilles de tôle et de platine ; si d'une autre part on prend une lame de fer, si on les place toutes les deux dans l'eau acidulée faible, l'action est des plus vives sur la lame formée des deux éléments ; elle est des plus faibles sur la lame de fer. Si on touche alors cette dernière lame avec un gros fil de platine, l'action est bien un peu augmentée au contact, mais elle est incomparablement plus faible que dans la lame corroyée, ce qui ne devrait pas être si la différence d'action ne devait être attribuée qu'à une différence de conductibilité ; car le platine appartient à la classe des conducteurs parfaits, et la section du fil est plus que suffisante pour laisser échapper l'électricité produite. Il se développe donc au contact des corps une force que Volta appelait *électro-motrice*, qu'il serait plus convenable d'appeler *électro-chimique* ; car c'est elle qui influe sur l'énergie de l'action chimique.

Voici une expérience qui prouve que cette force qui se développe au contact subsiste encore quelque temps après que le contact a cessé.

Après avoir retiré nos balles des différents vases, nous avons laissé s'écouler une heure ; elles furent ensuite placées dans quatre vases de verre semblables avec la même quantité d'acide : l'action dura une heure. La balle, qui avait été en contact avec le platine avait perdu 11, avec l'or 8, avec l'argent 5, avec le verre 1 $\frac{1}{2}$. Ces expériences rappellent les piles secondaires de Ritter, et concourent à prouver cette proposition fondamentale : *que l'état électrique qui se développe par le contact des corps persiste après ce contact* ; ces expériences démontrent également que les molécules des corps, qui ont subi par le contact des modifications qui ont augmenté leurs propriétés électriques, tendent par le temps à reprendre leur état primitif. Nos expériences étaient faites dans des conditions parfaitement semblables, et, sous l'in-

fluence du contact, nous avons obtenu les nombres 79, 65, 51, 1 $\frac{1}{2}$; après le contact, les nombres 11, 8, 5, 1 $\frac{1}{2}$, et avant le contact 2.

Cherchons maintenant à établir les relations numériques qui existent entre les différents corps sous le rapport de l'énergie qu'ils communiquent à l'action chimique lors de leur contact avec un même corps; on aura ainsi la mesure de la force électro-motrice de chaque corps. Pour cela, des balles de zinc pur furent placées dans des vases semblables de matières différentes, et furent laissées pendant le même temps avec les mêmes quantités du même dissolvant; après l'action, les balles furent pesées, et nous observâmes les différences suivantes :

NATURE DES VASES.	ACIDE hydrochlorique.	ACIDE sulfurique.	AMMONIAQUE.
Plombagine	10	»	»
Soufre	5	3	1
Étain	12	12	12
Plomb	14	28	15
Antimoine	41	38	18
Bismuth	45	38	20
Argent	58	65	22
Or	52	102	24
Platine	55	116	27
Cuivre	70	150	40
Laiton	124	190	103
Fer	»	130	»
Verre	4	3	»

Avant d'arriver aux nombres énoncés, il nous a fallu plusieurs tentatives. Nous opérions d'abord avec de l'acide contenant $\frac{1}{10}$ d'acide réel, et nous ne laissions continuer l'action que pendant cinq minutes; mais elle était si énergique que la température était sensiblement élevée. A ce degré de concentration, l'acide et le zinc se constituent mutuellement dans un état électrique si décidément opposé que l'influence du contact est rendue insensible par cette influence supérieure. Dans ces actions énergiques, nous avons remarqué que l'influence du contact pourrait agir, non comme force

électro-motrice, mais en raison du degré de conductibilité pour l'électricité des différents vases employés. Voici les nombres obtenus dans une de nos expériences avec de l'acide sulfurique à un dixième et du zinc du commerce: verre 51, soufre 53, antimoine 62, plomb 75, platine 76, étain 96, cuivre 110, argent 120, bismuth 132. On voit que la série précédente peut offrir des rapprochements avec celle établie pour la conductibilité, pour l'électricité, successivement par Davy et MM. Pouillet et Becquerel.

Pour apprécier convenablement l'influence du contact, il faut employer de l'acide assez faible pour que l'action soit à peine sensible; en se servant de vases qui déterminent une action électro-motrice très faible, il faut laisser continuer l'action un temps suffisant pour bien apprécier les différences, mais non assez pour que la quantité d'acide soit beaucoup diminuée dans les vases qui déterminent une action électro-motrice puissante. Il faut employer du zinc bien pur, car M. de la Rive a fait voir qu'avec du zinc du commerce contenant du fer, l'action était essentiellement différente; en effet, la petite proportion de fer suffit pour déterminer un état électro-chimique plus puissant.

Ce qui contribue à rendre l'action chimique si énergique avec certains métaux, tels que le cuivre, le fer, le laiton, c'est que ces métaux ne sont pas entièrement préservés par le zinc; la partie supérieure du vase est attaquée, mais le sel formé est aussitôt décomposé par le zinc qui se couvre de particules extrêmement fines de cuivre ou de fer, et toutes ces parties sont en contact et se constituent dans un état électrique différent qui favorise singulièrement l'action chimique; aussi, les nombres obtenus pour ces métaux qui ne sont pas complétement préservés ne doivent pas être considérés comme représentant exactement le pouvoir électromoteur de ces métaux; car il est une condition importante qui ne se trouve point réalisée, c'est celle d'égalité dans l'étendue du contact: la précipitation du métal augmente la surface du contact.

Avant de tirer les conclusions des expériences rapportées précédemment, après avoir examiné l'influence comparative des divers acides, voyons si l'énergie de l'action électro-motrice suivra le même ordre en employant des électro-moteurs

différents. Pour ce second ordre d'expériences, nous avons choisi l'étain, que nous opposerons ainsi au zinc. Nous avons mis des balles d'étain parfaitement semblables en contact avec les vases ci-après, contenant une quantité égale d'acide hydrochlorique très affaibli; l'action fut prolongée pendant une heure.

Verre	3
Soufre	5
Plomb	12
Argent	19
Antimoine	34
Bismuth	36
Cuivre	70
Platine	85
Or	201

Les expériences rapportées précédemment prouvent que le zinc se constitue, par rapport aux divers corps, dans des états électriques semblables, quelle que soit la nature du liquide employé; en effet, nous observons assez régulièremet la même série en employant l'acide sulfurique, hydrochlorique ou l'ammoniaque. Dans une suite d'expériences, où nous avons employé l'acide nitrique, nous devons dire que nous avons observé plusieurs aberrations assez constantes. Davy indique un ordre différent en employant des liqueurs acides, alcalines ou hydrosulfurées.

Si maintenant on compare la première à la deuxième série, il est évident que les conducteurs de première classe ne se constituent pas dans un état électrique semblable par rapport au zinc ou par rapport à l'étain; par rapport au zinc, le platine vient en première ligne; l'or, au contraire, le devance par rapport à l'étain; l'argent est très négatif par rapport au zinc, et vient immédiatement après l'or; par rapport à l'étain, il l'est beaucoup moins, et est séparé de l'or par le bismuth et l'antimoine. L'étude de ces aberrations est d'une bien grande importance pour la théorie chimique; nous pouvons dire avec certitude que lorsqu'on cherche à établir une série électro-chimique où chaque corps est positif ou négatif, par rapport à ceux qui le suivent ou le précèdent, on ne peut indiquer qu'une relation et non pas l'ensemble des relations qui existent entre ces corps; en effet, en changeant le corps qui sert de point de comparaison, on obtient une série différente.

Ainsi, quoique nous soyons convaincu, contrairement à l'opinion des partisans de la théorie chimique de la pile, que toute action chimique est subordonnée à l'état électro-moteur propre à chaque corps, nous croyons cependant qu'il est impossible d'établir une classification linéaire fixe et invariable en prenant seulement en considération l'état électrique réciproque des divers corps; il est indubitable qu'il existe des corps qui sont décidément positifs ou négatifs; il est aussi certain que, dans toute classification philosophique, on ne pourra les séparer, mais les ranger d'une manière fixe et linéaire; voilà ce qui ne pourra jamais s'exécuter.

Relation électro-chimique des corps simples d'après M. Berzélius.

2276. M. Berzélius a adopté pour base de sa classification chimique les relations électro-chimiques des corps simples. Voici, selon cet illustre chimiste, à peu près l'ordre dans lequel les corps simples se suivent relativement à leurs propriétés électro-chimiques générales et à celles de leurs plus forts oxides : Oxigène, Soufre, Nitrogène, Fluor, Chlore, Brome, Iode, Sélénium, Phosphore, Arsenic, Chrome, Molybdène, Tungstène, Bore, Carbone, Antimoine, Tellure, Tantale, Titane, Silicium, Hydrogène. — Or, Osmium, Iridium, Platine, Rhodium, Palladium, Mercure, Argent, Cuivre, Urane, Bismuth, Étain, Plomb, Cadmium, Cobalt, Nickel, Fer, Zinc, Mauganèse, Cérium, Thorium, Zirconium, Aluminium, Yttrium. Glucium, Magnésium, Calcium, Strontium, Barium, Lithium, Sodium, Potassium.

M. Berzélius, qui n'indique point avec détail les bases dont il est parti pour effectuer cette classification, avoue que cet ordre n'est qu'un *à peu près*, et qu'il pourra bien n'être plus le même lorsqu'on connaîtra mieux toutes les circonstances qui se rapportent à ce sujet. Nous avons montré que si l'on prend pour mesurer la force électro-motrice des divers électro-moteurs simples la différence d'action chimique produite par le seul fait de leur contact, toutes choses étant égales d'ailleurs, on peut établir ainsi une série électro-chimique en ordonnant tous les corps par rapport à un d'entre eux pris pour terme de comparaison; mais si l'on change les corps, la série électro-chimique obtenue change également. Ainsi, la force qui se développe au contact du corps qui détermine l'énergie des combinaisons chimiques,

et par suite l'énergie du courant électrique, est, comme l'affinité chimique, une force essentiellement relative qui varie avec chaque corps et qui est sous la dépendance d'un grand nombre de circonstances accessoires.

Influence du contact sur la cristallisation.

2277. Si l'électricité développée par le contact de deux corps hétérogènes exerce une action bien manifeste sur plusieurs réactions chimiques, cette influence, quoique moins évidente sur plusieurs phénomènes physiques, n'en est pas moins certaine. Les recherches si fécondes de M. Becquerel sur l'électricité moléculaire ont indiqué plusieurs relations entre l'électricité et la force qui détermine la cohésion et la cristallisation. Nous avons fait quelques expériences sur ce dernier objet; des solutions concentrées de sel marin furent évaporées dans différents vases, et nous avons observé les résultats suivants : dans l'or, de très petits cristaux cubiques; dans l'antimoine, le bismuth et l'étain, des cubes un peu plus gros; dans le platine, de plus grands cristaux. Ces cristaux prenaient encore un volume plus considérable dans le soufre, la plombagine, le verre; dans l'argent, c'étaient de grandes trémies cubiques. Dans le cuivre et le laiton, le sel se dépose sous forme de grandes lames mélangées de petits cubes; dans le zinc, de petits cubes sont mélangés d'aiguilles; dans le plomb on n'observe plus aucune apparence de cristallisation cubique, il ne se forme que des lames composées d'aiguilles prismatiques; ces cristaux, desséchés sur des feuilles de papier non collé, contiennent encore de l'eau, comme lorsque le sel marin cristallise dans une dissolution à plusieurs degrés au-dessous de zéro. Comme l'étendue des vases a une grande influence sur la cristallisation, je dois noter que ceux dans lesquels j'opérais n'avaient que 27 millimètres de diamètre.

Influence du contact sur les fermentations.

2278. L'influence du contact se fait sentir dans une foule de circonstances où l'on serait loin au premier abord de soupçonner son importance. Ainsi, dans l'acétification du vin, lorsqu'on opère dans des circonstances ordinaires, l'alcool absorbe l'oxigène de l'air, et se transforme en acide acétique; lorsqu'on agit sur le mercure, l'alcool est préservé, l'oxigène ne devient point partie constituante du produit, celui qui est absorbé se dégage à l'état d'acide carbonique, et l'acide acétique formé n'est produit qu'aux dépens des au-

tres matières organiques que le vin peut contenir. La fermentation alcoolique elle-même marche régulièrement dans les vases de verre, de porcelaine, de soufre, de platine ou d'autres métaux, mais elle languit ou s'arrête dans des vases de plomb ou de cuivre. On peut dire que, dans ce dernier cas, ce n'est point une influence de contact, mais que, par une très petite proportion d'un sel de plomb ou de cuivre, la vie s'anéantit dans les corpuscules de ferment.

M. Matteucci a fait voir que des muscles abandonnés à eux-mêmes ou placés sur des plaques de zinc ou de cuivre se putréfiaient d'une manière fort différente; j'ai montré que du lait conservé dans des vases de nature différente se coagulait dans un temps très variable. Le troisième jour après avoir été recueilli, la coagulation avait lieu dans la porcelaine, dans le verre, dans le plomb; le quatrième jour dans les vases de platine, d'or, et de fer-blanc; le cinquième jour dans ceux d'étain, de bismuth et d'antimoine; le sixième dans le soufre, le septième dans le zinc, et le neuvième, enfin, dans le cuivre et le laiton. Il se peut que, dans plusieurs de ces expériences, l'effet observé ne doive pas toujours être attribué au contact, mais à la réaction du liquide sur le métal oxidé; mais cette cause n'est certainement pas la seule, car dans plusieurs expériences cette réaction était nulle.

Conclusion. 2279. On le voit, cette force qui se développe au contact de tous les corps hétérogènes dont l'existence a été annoncée par Volta, a une influence plus ou moins marquée sur toutes les réactions chimiques, qui à leur tour déterminent l'intensité et la direction des courants électriques, qui se trouvent alors sous la dépendance primitive de cette force, obscure il est vrai, mais qu'il faut bien admettre comme point de départ de tous ces phénomènes.

FIN DE LA TROISIÈME ET DERNIÈRE PARTIE.

TABLE MÉTHODIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS LE SECOND VOLUME.

LIVRE SIXIEME.

CHALEUR.

Chap. I. Températures.

Chap. II. Changements de volume.

Chap. III. Changements d'état.

Chap. IV. Force des vapeurs.

Chap. V. Vapeurs considérées dans l'air.

Chap. VI. Chaleur spécifique.

Chap. VII. Chaleur latente.

LIVRE SEPTIÈME.

OPTIQUE.

LIVRE HUITIÈME.

MAGNÉTISME.

LIVRE NEUVIÈME.

ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

Chap. VI. De l'électricité développée par la pression et par la chaleur.

Chap. VII. De l'électricité atmosphérique.

LIVRE DIXIÈME.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

Chap. I. De la pile de Volta.

Chap. II. Phénomènes électro-magnétiques.

Chap. III. Phénomènes électro-dynamiques.

Chap. IV. Phénomènes thermo-électriques.

Chap. V. Phénomènes d'induction.

Chap. VI. Phénomènes électro-chimiques.

Chap. VII. De l'électricité dynamique dans ses rapports avec la physiologie.

Chap. VIII. Des phénomènes lumineux déterminés par l'électricité.

FIN DE LA TABLE.

appareil; 2° sur l'Antimoine; 3° sur le Plomb; 4° sur le Cuivre; 5° sur le Sang; 6° sur le Sperme. 2 vol. in-8° de 1,200 pag. et 4 pl. représentant 50 fig. 1841. 9 fr.

GROSOURDY. Traité de chimie considérée dans ses applications à la médecine, tant théoriques que pratiques (*ouvrage spécialement destiné aux Élèves en médecine et en pharmacie*). 1839, 2 vol. in-8, fig. 14 fr.

GUYOT (Jules). Éléments de physique générale. Paris, 1832, in-8, broché. 3 fr. 50 c.

GUYOT (Jules). Des mouvements de l'air et des pressions de l'air en mouvement. Paris, 18535, in-8. 2 fr. 50 c.

POUPIN. Caractères phrénologiques et physiognomoniques des Contemporains les plus célèbres, selon les systèmes de Gall, Spurzheim et Lavater, avec des remarques biographiques, historiques, physiologiques et trente-sept portraits lithographiés d'illustrations contemporaines, telles que Léopold Robert, Henrion de Pansey, Gall, Casimir Périer, Walter Scott, Jacques Laffitte, Lamarque, Dupuytren, Talleyrand, Paganini, Fontaine, Broussais, Scribe, Dupin aîné, Béranger, Lamartine, Boissy d'Anglas, Chateaubriand, Silvio Pellico, Hoffmann, Victor Hugo, Jules Janin, Henri Monnier, Orfila, Gros, Arago, Ch. Dupin, Paul Delaroche, Dumont d'Urville, Ampère, Cuvier, Andrieux, Lablache, Rossini, Sylvestre de Sacy, de Lamennais, Geoffroy-Saint-Hilaire. Paris, 1837, 1 fort vol. in-8. 10 fr.

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE DU MAGNÉTISME ANIMAL, ou Méthode facile pour apprendre à magnétiser. Par J.-J.-A. Ricard, directeur du journal du magnétisme animal. 1841, 1 vol. in-8. 6 fr.

DICTIONNAIRE DES DICTIONNAIRES DE MÉDECINE FRANÇAIS ET ÉTRANGERS, ou Traité complet de médecine et de chirurgie pratiques, de thérapeutique, de matière médicale, de toxicologie et de médecine légale, etc.; contenant l'Analyse des meilleurs articles qui ont paru jusqu'à ce jour dans les différents dictionnaires et les traités spéciaux les plus importants; par une société de Médecins, sous la direction du docteur Fabre, rédacteur en chef de la Gazette des hôpitaux. 6 forts vol. grand in-8, sur deux colonnes, imprimés sur beau papier cavalier, et en caractères neufs. 40 fr.

ESSAI SUR LES PRINCIPES ÉLÉMENTAIRES DE L'ÉDUCATION; par *G. Spurzheim*, docteur en médecine; 1822, 1 vol. in-8. 3 fr. 50 c.

ESSAI PHILOSOPHIQUE SUR LA NATURE MORALE ET INTELLECTUELLE DE L'HOMME; par *G. Spurzheim*, docteur en médecine. 1820, 1 vol. in-8. 4 fr. 50 c.

LEURET et LASSAIGNE. Recherches physiologiques et chimiques pour servir à l'histoire de la digestion. 1825, in-8. 4 fr. 50 c.





